

[Введіть текст]

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний факультет

Кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем

«На правах рукопису»
УДК 621.307.13

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
В.о. завідувача кафедри
д.т.н., професор Защепкіна Н.М.

_____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

на тему «Інформаційно-вимірювальна система лінійних розмірів на приладах із зарядовим зв'язком»

Виконала: студентка VI курсу, групи ПН-61м
Дубова Марія Владиславівна

(підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н. Маркін М.О.

(підпис)

Рецензент _____

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"
Приладобудівний факультет
Кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри НАЕПС
_____ Н.М.Защепкіна
«_____» _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ **на магістерську дисертацію студенту** **Дубовій Марії Владиславівні**

1. **Тема дисертації:** «Інформаційно-вимірвальна система лінійних розмірів на приладах із зарядовим зв'язком»
науковий керівник дисертації Маркін Максим Олександрович, к.т.н., доцент
затверджені наказом по університету від «_____» _____ 201__ р. № ____.
2. **Термін подання** студентом дисертації "14" травня 2018 р.
3. **Об'єкт дослідження** – процес формування вимірвального сигналу в інформаційно-вимірвальній системі на приладах із зарядовим зв'язком для визначення лінійних розмірів мікрооб'єктів.
4. **Предмет дослідження** – характеристики інформаційно-вимірвальної системи на приладах із зарядовим зв'язком для визначення лінійних розмірів мікрооб'єктів.
5. **Перелік завдань, які потрібно розробити:**
 - 5.1 Теоретичні дослідження:
 - 5.1.1 Виконати аналіз сучасних вимог до діапазонів та точності вимірювання геометричних розмірів шкал та сіток.

5.1.2 Виконати огляд та аналіз оптичних та оптико-електронних засобів вимірювання геометричних розмірів шкал та сіток.

5.1.3 Скласти порівняльну таблицю характеристик сучасних засобів вимірювання геометричних розмірів шкал та сіток.

5.1.4 Скласти порівняльну таблицю методів вимірювання геометричних розмірів шкал та сіток.

5.1.5 Обґрунтувати вимоги до засобів на приладах із зарядовим зв'язком для вимірювання геометричних розмірів шкал та сіток.

5.2 Експериментальні дослідження:

5.2.1 Обґрунтувати вибір характеристик, які підлягають дослідженню та розробити методики експерименту.

5.2.2 Обґрунтувати вимоги до освітлювального блоку та вибір джерела випромінювання. Розрахувати оптимальну енергетичну яскравість поверхні об'єкту.

5.2.3. Розробити методики та виконати експериментальні дослідження геометричних параметрів тестових об'єктів на прикладі штрихових мір.

5.2.4 Розробити методики та виконати експериментальні дослідження геометричних розмірів шкал та сіток.

5.2.5 Розробити лабораторний макет для вимірювання геометричних розмірів шкал та сіток.

5.2.6 Обґрунтувати вибір тестових об'єктів, реалізувати режим переміщення, дослідити інтервал переміщення об'єкту.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

6.1 Таблиці з результатами порівняльного аналізу характеристик сучасних засобів вимірювання геометричних розмірів шкал та сіток.

6.2 Вимоги до діапазонів та точності вимірювання геометричних розмірів шкал та сіток.

6.3 Характеристики оптичних та оптико-електронних засобів вимірювання геометричних розмірів шкал та сіток.

6.4 Результати експериментальних досліджень.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

7.1 Доповідь на міжнародній конференції.

7.2 Стаття у фаховому виданні.

8. Консультанти розділів дисертації:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання: «11» вересня 2017 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, аналіз методів вимірювання	10.11.2017	
2	Аналіз засобів вимірювання	10.12.2017	
3	Оформлення першого розділу	20.12.2017	
4	Обґрунтування та формалізація параметру оцінки вимірювань	25.12.2017	
5	Побудова лабораторного макету	14.01.2018	
6	Виконання теоретичних досліджень	15.02.2018	
7	Розробка методик виконання експериментів і виконання експериментальних досліджень	25.04.2018	
8	Виконання розділу стартап-проектів	10.05.2018	
9	Оформлення пояснювальної записки	14.05.2018	
10	Подача дисертації на передзахист	14.05.2018	

Студентка

(підпис)

/М. В. Дубова/

Науковий керівник дисертації

(підпис)

/М.О. Маркін/

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 126 с., 35 рис., 18 табл., 2 додатки, 30 джерела.

Інформаційно-вимірювальна система лінійних розмірів на приладах із зарядовим зв'язком. Лабораторний стенд розроблений на основі телевізійної інформаційно-вимірювальної системи.

Наведені структурна схема, креслення та опис роботи лабораторного стенда. Проведено експериментальні дослідження по вимірюванню мікророзмірів і мікропереміщень.

Об'єктом дослідження є процес формування вимірювального сигналу в інформаційно-вимірювальній системі на приладах із зарядовим зв'язком для визначення лінійних розмірів мікрооб'єктів.

Предметом дослідження є характеристики інформаційно-вимірювальної системи на приладах із зарядовим зв'язком для визначення лінійних розмірів мікрооб'єктів.

Отримані результати свідчать про цінність проаналізованих методів та розроблених методик та їх інформативність. Розроблені методики впроваджені в процес визначення світлового потоку та інших світлотехнічних параметрів ОВ та впроваджено в навчальний процес.

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, ЛІНІЙНІ РОЗМІРИ, ПРИЛАД ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ.

ABSTRACT

Master's degree dissertation: 126 p., 35 fig., 18 tables, 5 applications, 30 sources.

Information-measuring system of linear sizes on devices with charge communication. Laboratory stand is developed on the basis of television information measuring system.

The given structural scheme, drawings and description of the work of the laboratory stand. Experimental studies on microscopic measurements and micro-displacements have been carried out.

The object of research is the process of measuring the measuring signal in the information-measuring system on charge-coupled devices to determine the linear size of microobjects.

The subject of the study is the characteristics of the information-measuring system on charge-coupled devices to determine the linear sizes of microscopic objects.

The obtained results testify to the value of the analyzed methods and developed methods and their informativity. The developed techniques are implemented in the process of determining the light flux and other lighting parameters of the OV and is implemented in the educational process.

INFORMATION-MEASURING SYSTEM, LINEAR DIMENSIONS,
DEVICE WITH CHARGE COMMUNICATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	13
1.1 Класифікація методів.....	13
1.2 Безконтактні методи	14
1.2.1 Метод конфокальної лазерної скануючої мікроскопії.....	14
1.2.2 Метод ближнього поля.....	17
1.2.3 Дифракційний метод	18
1.2.4 Растровий метод.....	18
1.2.5 Тунельний метод.....	20
1.2.6 Оптично-світловий метод	21
1.3 Контактні методи	23
1.3.1 Ноніусний метод.....	23
1.4 Огляд та аналіз методів визначення мікропереміщень.....	24
1.4.1 Растрові методи контролю лінійних мікропереміщень	24
1.4.2 Методи контролю лінійних мікропереміщень, засновані на принципах геометричної оптики.....	26
1.4.3 Інтерференційні методи контролю лінійних мікропереміщень	30
1.5 Огляд приладів та систем для визначення геометричних параметрів у мікронному діапазоні.....	32
1.5.1 Вимірювальний мікроскоп ДІП-6У	32
1.5.2 Універсальний вимірювальний мікроскоп УИМ- 21	34
1.5.3 Оптиметр горизонтальний ИКГ	35
1.5.4 Мікрометр МКЦ-25	35
1.6 Огляд приладів та систем для визначення переміщень у мікронному діапазоні.....	36
1.6.1 Лазерна вимірювальна система ЛИС-01М.....	36
1.6.2 Оптико-електронний вимірювач мікропереміщень ОЕВМ	38
1.6.3 Датчик нанопереміщення серії IDS-4.....	40

1.6.4 Скануюча зондова лабораторія Ntegra Prima.....	42
1.7 Аналіз шляхів вдосконалення телевізійних засобів вимірювання .	43
1.7.1 Застосування та класифікація телевізійних засобів	43
1.7.2 Виявлення і розпізнавання об'єктів	45
1.7.3 Стеження і вимір координат об'єктів.....	46
1.7.4 Оцінка похибки ТВС при визначення геометричних параметрів	47
1.8 Порівняльний аналіз оптичних методів вимірювання розмірів шкал та сіток.....	48
1.8.1 Метод динамічного розсіяння світла.	50
1.8.2 Лазерна дифракція	53
1.8.3 Статичне розсіювання світла.....	54
1.8.4 Оптичне визначення однієї частинки	56
1.8.5 Інші методи.....	58
1.8.6 Вимірювання лінійних та кутових розмірів.....	60
1.8.7 Методи і засоби лінійних вимірювань	65
1.8.8 Прилади для відносних вимірювань	65
1.8.9 Прилади для абсолютних вимірювань	66
Висновки до розділу 1	67
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ.....	68
2.1 Принципи побудови оптимальної структури оптико-електронного приладу для визначення геометричних розмірів об'єктів	68
2.2 Аналіз проблем вимірювання геометричних параметрів за допомогою ОЕП	72
Висновки до розділу 2	75
РОЗДІЛ 3 БУДОВА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ НА ПРИЛАДАХ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ	77
3.1 Вибір мікроскопу	77

3.2 Вибір телевізійної камери	81
3.3 Лабораторний макет для вимірювання геометричних параметрів ..	85
3.4 Дослідження впливу налаштувань відеопроцесора на світлосигнальну характеристику.....	93
3.4.1 Методика виконання експерименту	94
3.4.2 Розрахунок і побудова світлосигнальної характеристики	94
Висновки до розділу 3	97
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ НА ПРИЛАДАХ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ.....	98
4.1 Досліджуваний об'єкт	98
4.2 Метод визначення геометричних розмірів шкал та сіток.....	98
4.3 Експериментальні дослідження параметрів тестових об'єктів на прикладі штрихових мір.....	99
4.3.1 Методика калібрування ОЕП	99
4.3.2 Дослідження коефіцієнта пропорційності телевізійної інформаційно-вимірювальної системи на основі телевізійної камери Novus NVC 530H.....	100
4.4 Аналіз освітленості матриці телевізійної вимірювальної системи	104
Висновки до розділу 4	112
Додатки	135

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП — аналого-цифровий перетворювач

АЧТ — абсолютно чорне тіло

БЗП — безтигельна зонна плавка

ВКП — відеоконтрольний пристрій

ЕПБЗП — електронно-променева безтигельна зонна плавка

ПЗ — програмне забезпечення

ПЗЗ — прилад із зарядовим зв'язком

ПК — персональний комп'ютер

СЕР — світлоелектричний перетворювач

ТЗВ — телевізійний засіб вимірювання

ВСТУП

У класифікації фізичних величин за їх фізичними властивостями (прийнятій, зокрема, в Міжнародній системі одиниць) одну із величин становлять величини простору та часу, до якої належать геометричні розміри, час та параметри руху.

Геометричні розміри – це широка група понять лінійних та кутових розмірів, площі та об'єму.

Своєю чергою, до лінійних розмірів належить довжина, товщина (грубизна) покриття, відстань між об'єктами, рівень, шорсткість (нерівність) поверхні тощо.

Головними кутовими розмірами є плоский та тілесний кути.

Час є однією із семи основних одиниць СІ. Час, як і простір, – це одна із форм існування матерії. Вони нерозривно пов'язані між собою, характеризуючи, зокрема, параметри руху матерії, тобто динаміку матерії в просторі та в часі.

Лінійні та кутові переміщення, швидкості та прискорення характеризують просторово-часовий стан об'єктів (матерії) одного щодо іншого, прийнятого за нерухомий. Одним із різновидів параметрів руху є витрати рідких чи газоподібних речовин.

В оптичних і оптико-електронних вимірювальних приладах застосовують візуальну, фотографічну і оптико-електронну реєстрацію вимірюваної інформації. Візуальна реєстрація забезпечує досить високу точність при простій схемній реалізації, зручність і наочність при початковій установці і юстуванні, надійність і довговічність приладу. Однак вона застосовується тільки у видимій області спектру, вимагає тривалого часу для зняття відліку, схильна до помилок оператора і виключає автоматизацію процесу вимірювання. Фотографічна реєстрація дозволяє обробляти і документувати одночасно великий об'єм вимірювальної інформації у видимій, ближній УФ та ближній ІЧ областях спектру (спектрограф) з досить

високою точністю, але вимагає застосування спеціальних процесів і технічних засобів для обробки фотоматеріалів, займає багато часу, ускладнює автоматизацію процесу вимірювання. Оптико-електронна реєстрація застосовується у всіх областях спектру, характеризується високою чутливістю, точністю, дуже малою постійною часу, легко автоматизується і комп'ютеризуються. Однак вимагає складних електронних систем і викликає труднощі при початковій установці і юстуванні. Перспективним і широко застосованим у даний час методом є об'єднання в одному приладі візуальної і оптико-електронної реєстрації. При цьому в стадії налаштування використовується візуальний канал, а для робочих вимірювань – оптико-електронний.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Класифікація методів

На сьогодні в промисловості для вимірювань мікророзмірів використовується багато різновидів приладів, заснованих на різних методах. Розвиток існуючих та створення нових методів вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів неможливі без аналізу досягнутого рівня, їх різновидів і якості існуючих підходів.

Класифікація методів вимірювання мікроскопічних об'єктів представлена на рисунку 1.1.

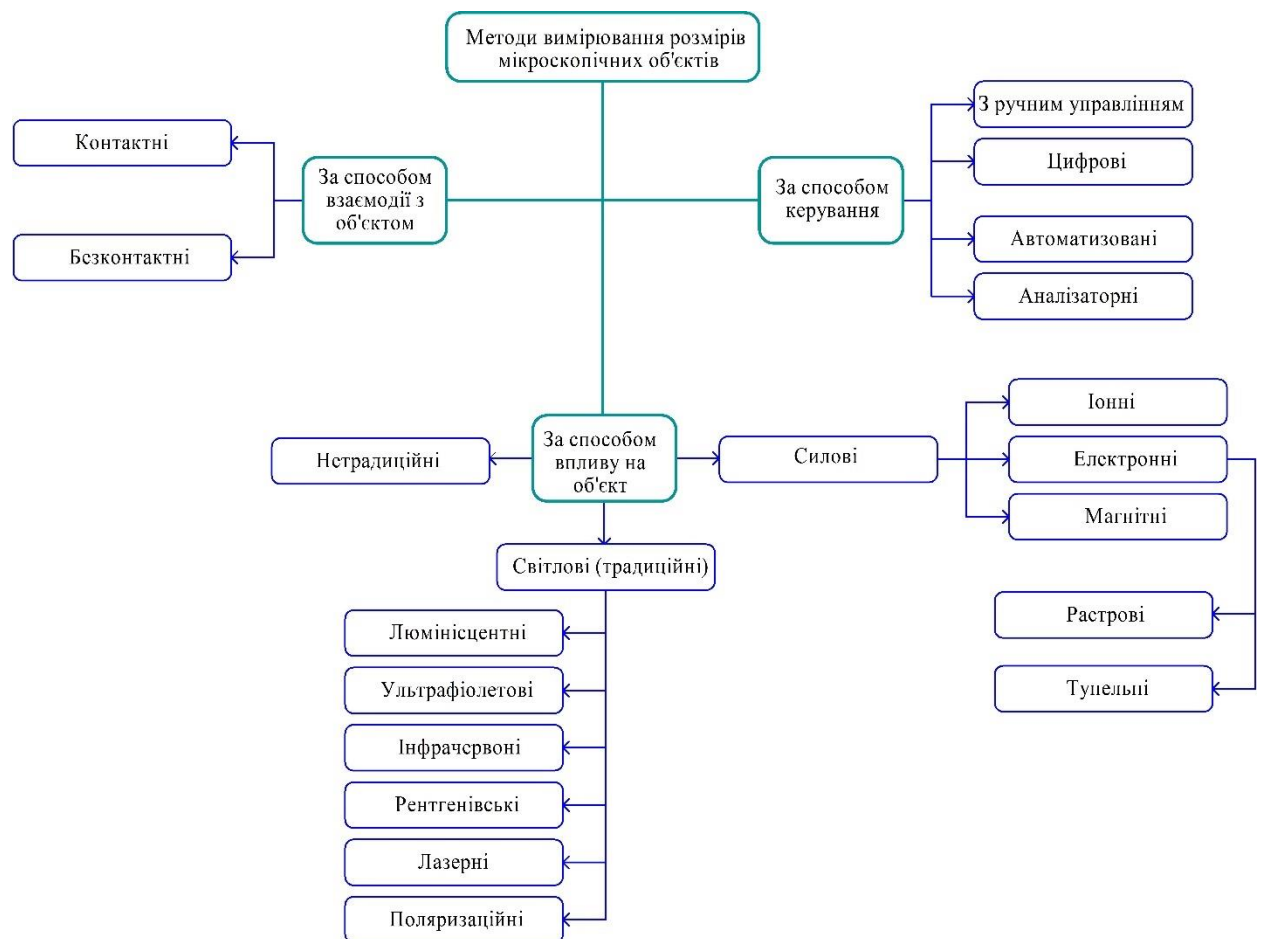


Рис. 1.1 - Класифікація методів вимірювання мікроскопічних об'єктів

Основною ознакою класифікації відомих методів вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів є специфіка впливу на об'єкт, який обумовлює власне сам процес вимірювання та його особливості. Таким чином з усіх

методів можна виділити світлові (традиційні), електронні та нетрадиційні методи вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів. Світлові методи вимірювання поділяються на люмінесцентні, ультрафіолетові, інфрачервоні, рентгенівські, лазерні, поляризаційні та інші, а силові – на іонні, електронні (растрові та тунельні) та магнітні. Нетрадиційні методи поєднують різні процеси вимірювання та пристосовані або спеціально призначені для використання в мікроелектроніці.

Встановлено, що переважна більшість методів вимірювання є світловими, в яких реєстрація об'єкта виконується за допомогою фотоприймальних приладів, таких як фотолінійка та фотоматриця.

За способом взаємодії з об'єктом методи вимірювання розмірів поділяються на контактні та безконтактні. В порівнянні з контактними, безконтактні мають ряд переваг, основною з яких є те, що ці методи не взаємодіють з об'єктом, що виключає пошкодження його структури.

За способом керування методи вимірювання можна поділити на: традиційні з ручним керуванням, цифрові, автоматизовані та аналізаторні. В традиційних методах з ручним керуванням відповідальність за умови нагляду, вибір об'єктів та результати аналізу в повній мірі покладається на лаборантів. Іншим видом є так звані «цифрові» методи, в яких зображення поля зору за допомогою відеокамери чи цифрового фотоапарату передаються в комп'ютер та піддаються в ньому програмній обробці системами аналізу зображення [1].

1.2 Безконтактні методи

1.2.1 Метод конфокальної лазерної скануючої мікроскопії

Вимірювальні прилади, засновані на методі конфокальної лазерної скануючої мікроскопії (КЛСМ), в даний час отримали найбільш широке поширення серед інших нетрадиційних методів контролю.

Оптична схема такого мікроскопа зображена на рисунку 1.2. Контрольований зразок у КЛСМ сканується сфокусованим лазерним пучком.

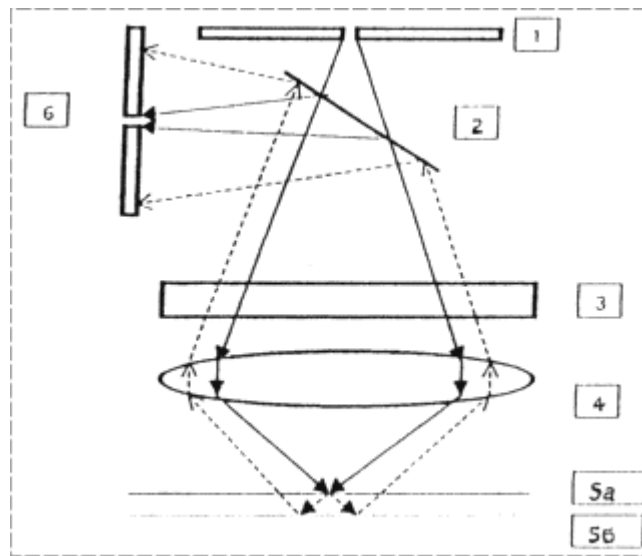


Рис. 1.2 – Структурна схема конфокального мікроскопа

Світловий пучок лазера фокусується на точковій діафрагмі - джерелі 1 і, пройшовши через напівапрозоре дзеркало 2, блок сканування 3 і мікрооб'єктив 4, створює зображення цього отвору в площині зразка 5. Відбитий від зразка пучок тією ж оптичною системою збирається і, відбиваючись від напівапрозорого дзеркала 3, потрапляє на іншу точкову діафрагму 6, за якою розташований фотоприймач. У такій оптичній системі відхилення площини зразка 5б від предметної площини 5а, в якій лежить точка фокуса об'єктива, викликає дефокусування відбитого сигналу в площині приймальної діафрагми 6 і різке зменшення сигналу на вході фотоприймача. Контрольоване переміщення зразка у вертикальному напрямку до суміщення з предметною площиною дозволяє знову отримати сигнал на вході фотоприймача, при цьому фіксується переміщення, а отже, і відхилення площини зразка від вихідного стану, тобто висота сходинки.

Таким чином, за допомогою конфокального мікроскопа можлива побудова тривимірного зображення за допомогою пошарового сканування зразка по глибині.

На відміну від традиційного мікроскопа для КЛСМ збільшення числової апертури об'єктиву і зменшення довжини хвилі світла призводять до збільшення роздільної здатності та отримання більшої інформації про перехідну область на краю елемента. Крім того, мала глибина різкості в КЛСМ дає можливість виключити фон, створюваний іншими слоями в картині зображення, і, таким чином, отримати контрастне зображення навіть для малоконтрастних об'єктів. Відсутність інтерференції променів, відбитих від верхнього і нижнього плато, дає можливість отримати зображення, яке не залежить від висоти елемента і оптичних характеристик матеріалу. Використання монохроматичного джерела випромінювання в КЛСМ виключає накладання декількох профілів зображення, створюваних багатьма світловими пучками з різними довжинами хвиль (як це відбувається в звичайному мікроскопі), що підвищує чутливість вимірювального приладу до зміни ширини контрольованого елемента.

На підставі теоретичних досліджень можна зробити висновок про більш високу роздільну здатність КЛСМ в порівнянні із звичайним мікроскопом при однакових параметрах використовуваної в них оптики.

Діапазон лінійних розмірів, який можна контролювати на конфокальному мікроскопі при довжині хвилі світла 0,486 мкм, складає близько 0,2 мкм. Можливість вертикального сканування контрольованого зразка дозволяє виміряти його ширину окремо по верхньому і нижньому шару.

Слід зазначити, що ноніусний метод вимірювання використовується досить широко, але для визначення розмірів мікрооб'єктів він має невелику точність.

До нечисленних недоліків методу конфокальної мікроскопії можна віднести високу вартість обладнання, і більш низьке відношення сигнал/шум одержуваного в підсумку зображення [3].

1.2.2 Метод ближнього поля

Даний метод заснований на скануванні об'єкта контролю зондуєчим пучком, що пройшов через діафрагму в непрозорому екрані розміром менше довжини хвилі світла. Електромагнітне поле за такою діафрагмою "провисає" на відстань, приблизно рівну половині довжини хвилі світла, і взаємодіє з ділянкою поверхні об'єкта контролю, якщо він розташований на відстані, меншій зазначеної величини. Відбите або те, що пройшло світло реєструється чутливим фотоприймачем. У разі якщо поверхня контрольованого об'єкту знаходиться на відстані, більшій за половину довжини хвилі світла, ініціюється процес вертикального сканування до появи сигналу від фотоприймача. Основна перевага скануючої мікроскопії ближнього поля СМБП є висока роздільна здатність. Найменший розмір елемента, отриманого за допомогою СМБП, становить 20 нм при довжині хвилі світла 0,486 нм. У зображенні контрольованого елементу відсутні дифракційні або інтерференційні ефекти, що ускладнюють визначення його кордонів. Відсутні труднощі й у контролі відносно товстих елементів - як і в методі КЛСМ, вони долаються чисто технічним методом - пошаровим скануванням зразка.

Відмінною особливістю СМБП в порівнянні з атомно-силовим мікроскопом є чутливість до оптичних характеристик поверхні контрольованого зразка, довжині хвилі світла, люмінесценції та ін.

Однією з основних проблем, що перешкоджають використанню цього метода в наукових дослідженнях, є висока вартість мікроскопа і короткий "час життя" оптичних зондів, яке часто не дозволяє отримати навіть одиничного закінченого зображення. Причиною цього є низька швидкодія системи утримання зонда щодо поверхні, або низька чутливість такої системи, що призводить до ударів зонда про поверхню і швидкого руйнування субмікронної апертури. [2]

1.2.3 Дифракційний метод

В даний час для вимірювань мікронних і субмікронних розмірів розроблені лазерні дифрактометри ЛД, в яких ширина (період) елемента визначається за параметрами дифракційного спектра, що виникає при освітленні одного або групи елементів у вигляді дифракційної решітки пучком когерентного світла. Основне завдання в дифракційному методі вимірювань - відновлення геометричної структури елементів тест-об'єктів по дифракційній картині інтенсивності. Це вимагає проведення теоретичних досліджень з відновлення профілю періодичної структури за значеннями інтенсивності головних дифракційних максимумів (ГДМ) з використанням математичних моделей, тобто пов'язане з вирішенням зворотної задачі дифракції.

Перевагою застосування дифракційного методу є простота вимірів, можливість визначення статистичних параметрів величин без проведення окремих спостережень і вимірів безпосередньо з автоматизованою обробкою результатів вимірювань за допомогою ПК.

Основна методична похибка вимірювань ширини елемента топології об'єкта пов'язана з наближеними розрахунками її величини при використанні скалярної теорії дифракції і для розмірів 0,4 - 20 мкм може складати 0,1 - 0,3 мкм. [2]

1.2.4 Растровий метод

Вимірювання лінійних розмірів за допомогою растрового електронного мікроскопа (РЕМ) можуть проводитися двома способами. У першому РЕМ використовується як засіб візуалізації та позиціонування мікрооб'єкта, а вимірювання проводяться незалежно з використанням методів лазерної інтерферометрії. Другий спосіб полягає у безпосередньому вимірі розмірів в полі зору РЕМ по задаваному збільшенню. Слід зазначити, що другий спосіб вимірювань аналогічний вимірюванню лінійних розмірів за допомогою оптичних мікроскопів. У цьому випадку повинні бути відомі похибка

збільшення РЕМ і методика проведення вимірювань за що задається збільшення. РЕМ в даній методиці виступає як компаратор, що порівнює вимірюваний об'єкт з еталонною мірою, по якій градується його збільшення. Таке порівняння дозволяє позбутися від похибки визначення збільшення РЕМ, яка в діапазоні до 20 тисяч може досягати 30 %.

Для виключення похибки, обумовленої спотворенням зображення на екрані електронної трубки через нелінійність розгортки, вимірювання необхідно проводити без візуалізації структури об'єктів за профілем детектованого відеосигналу. Такий спосіб вимірювань розмірів елементів вимагає наявності атестованих періодичних еталонних мір малої довжини (атестація цих заходів може бути проведена з використанням методу лазерної дифрактометрії) [4].

Висока роздільна здатність, великий діапазон збільшень (до 100 000 і вище), велика глибина фокусування (~ 100 мкм), різноманіття режимів роботи і можливість отримання інформації про об'єкт у вигляді електричного сигналу дають можливість розробки високочутливого засобу вимірювань лінійних розмірів на основі РЕМ.

Однак РЕМ - метод характеризується низкою обмежень і недоліків, які особливо сильно проявляються в субмікронному і нанометровому діапазонах вимірювань :

- недостатньо високу просторову роздільну здатність, що не дозволяє з необхідною точністю контролювати розміри навіть субмікронних елементів;
- складність отримання тривимірних зображень поверхні, обумовлена в першу чергу тим, що висота рельєфу в РЕМ визначається по ефективності пружного і непружного розсіювання електронів і залежить від глибини проникнення первинних електронів в поверхневий шар ;
- проведення вимірювань тільки в умовах вакууму;
- можливість пошкодження досліджуваної поверхні високоенергетичним сфокусованим пучком електронів [5].

1.2.5 Тунельний метод

Вимірювання лінійних розмірів за допомогою скануючого тунельного мікроскопа (СТМ) засновано на квантовому ефекті тунелювання електронів через вузький потенційний бар'єр між досліджуваною металевою поверхнею і вістрям мікрозонда. Тунелювання добре вивчено у випадку плоских електродів, який на практиці реалізується, наприклад, в системах метал - діелектрик - метал. У разі СТМ один з плоских електродів замінюється вістрям - голкою, яке кріпиться на X, Y, Z - позиціонері (рис. 1.1.3). Це вістря за допомогою позиціонера підводиться до другого електроду, яким є досліджувана металева поверхня, до тих пір, поки не з'явиться в ланцюзі тунельний струм. При відстані між електродами ≤ 1 нм і додатку різниці потенціалів $U = 0,1 \div 1,0$ В тунельний струм має цілком вимірну величину 1-10 нА. Тунельний струм дуже чутливий до величини зазору і експоненціально змінюється приблизно на порядок при переміщенні вістря по нормалі до поверхні зразка на 0,1 нм [6].

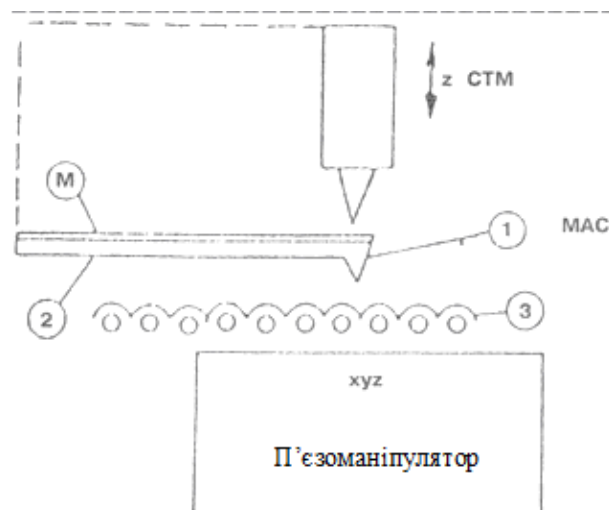


Рис. 1.3 – Принцип роботи СТМ

Робота СТМ здійснюється наступним чином: при постійній напрузі вістря переміщається над поверхнею, при цьому за допомогою зворотного зв'язку, що впливає на п'єзоелемент, на якому закріплено вістря, тунельний струм підтримується постійним. Тоді відповідно до рельєфу поверхні

досліджуваного зразка змінюється напруга на керуючому п'єзоелементі. Якщо робота виходу електронів постійна уздовж поверхні, то одержуваний при скануванні сигнал безпосередньо дає інформацію про топографію поверхні в атомному масштабі.

Варіації роботи виходу можуть привести до спотворень зображення, які, як правило, малі і до того ж можуть бути враховані шляхом вимірювань варіацій роботи виходу в тому ж самому експерименті. Для цього величину зазору треба промодельовувати на малу величину і виміряти змінну складову тунельного струму [7].

До переваг методу можна віднести:

- неруйнівний характер вимірювань, обумовлений відсутністю механічного контакту і низькою енергією тунелюючих електронів;
- можливість проводити вимірювання як в вакуумі, так і при атмосферних умовах, а також у діелектричних рідинах;
- можливість роботи в широкому діапазоні температур;
- відносно висока швидкість формування зображення вимірюваного об'єкта з атомною роздільною здатністю.

Отримавши вже досить широке поширення скануюча тунельна мікроскопія, хоч і володіє значно більшою високою роздільною здатністю, ніж РЕМ, проте не дозволяє безпосередньо отримувати зображення поверхні непровідних матеріалів. Крім того на точність відображення рельєфу поверхні в СТМ помітно впливають щільність електронних станів поблизу поверхні і робота виходу [6].

1.2.6 Оптично-світловий метод

В даний час оптичний мікроскоп є основним засобом контролю лінійних розмірів. Його високі експлуатаційні якості - простота, надійність, слабкий вплив на об'єкт вимірів, висока швидкість отримання результату, а також відносно низька вартість - часто (особливо в промисловості) змушують

віддавати йому перевагу серед інших засобів вимірювань, таких як, наприклад, растрова електронна або атомно - силова мікроскопія [8].

Технічне вдосконалення оптичних мікроскопів перетворило їх на високоавтоматизовані вимірювальні інструменти (фотоелектричні, телевізійні мікроскопи), в яких профіль зображення контрольованого елементу реєструється і обробляється за допомогою комп'ютера. Це дозволило виключити суб'єктивну похибку і досягти відтворюваності вимірювань лінійних розмірів в тисячні частки мікрометра.

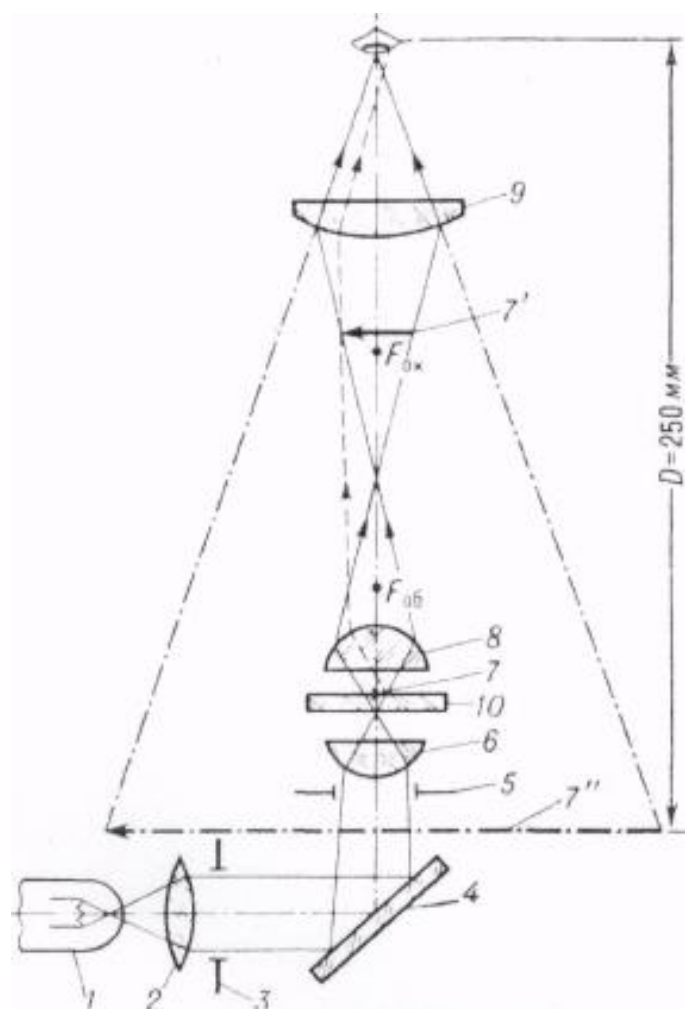


Рис. 1.4 – Схема оптичного-світлового мікроскопа

Схема оптичного-світлового мікроскопа приведена на рисунку 1.4. Досліджуваний об'єкт 7 розташовують на наочному склі 10. Конденсор 6 концентрує на об'єкті пучок світла, що відбивається від дзеркала 4. Джерелом світла найчастіше служить спеціальний освітлювач, що складається з лампи і

лінзи – колектора (відповідно 1 і 2); іноді дзеркало направляє на об'єкт звичайне денне світло. Діафрагми - польова 3 і апертурна 5 обмежують світловий пучок і зменшують в ньому частку розсіяного світла, що потрапляє на об'єкт «зі сторони» і не бере участь у формуванні зображення.

Виникнення зображення об'єкта в основних (хоча і найбільш простих) рисах можна описати в рамках геометричної оптики. Промені світла, які виходять від об'єкта 7, заломлюючись в об'єктиві 8, створюють перевернуте і збільшене дійсне оптичне зображення 7' об'єкту. Це зображення розглядають через окуляр 9. При візуальному спостереженні мікроскоп фокусують так, щоб зображення об'єкту 7' знаходилося безпосередньо за переднім фокусом окуляра F_{ok} . У цих умовах окуляр працює як лупа: даючи додаткове збільшення, він утворює уявне зображення 7'' (раніше перевернуте); проходячи через оптичні середовища ока спостерігача, промені від 7'' створюють на сітківці ока дійсне зображення об'єкта. Зазвичай 7'' розташовується на відстані найкращого бачення D від ока. Якщо зрушити окуляр так, щоб 7' виявилось перед F_{ok} , то зображення, що дається окуляром, стає дійсним і його можна отримати на екрані або фотоплівці; за такою схемою виробляють, зокрема, фото - і відеозйомку мікроскопічних об'єктів.

Перевагами такого метода є простота, надійність, слабкий вплив на об'єкт вимірів, висока швидкість отримання результату, а також низька вартість [3].

1.3 Контактні методи

1.3.1 Ноніусний метод

Найбільш використовуваними на практиці інструментами для вимірювання лінійних розмірів є штангенінструменти. Більшість з яких побудовано на використанні ноніусних шкал.

Їх відмінною рисою є наявність двох шкал: основний і додаткової (ноніусної), зрушеної по відношенню до основної на величину від 0,05 до 0,1

мм поділки. Підсумковий результат вимірювання є поєднанням показань обох шкал. На цьому методі побудовані такі інструменти, як: мікрометр, штангенциркуль, штангенглибиномір, штангенрейсмус.

Плюсами приладів побудованих на цьому методі є: низька вартість, простота конструкції та використання, надійність. Але в той же час вони мають суттєві недоліки: відносно малий діапазон вимірювання та велику похибку вимірювань.

1.4 Огляд та аналіз методів визначення мікропереміщень

Сучасна астрономія, наука, медицина и промисловість широко використовують відеокамери як інформаційно-вимірювальні системи. Такі системи здатні виконувати фотометричну і геометричну ідентифікацію об'єкта дослідження. Велику частину всіх вимірювань складають вимірювання лінійних мікропереміщень.

Існує ряд оптичних методів контролю переміщень, які дозволяють проводити високоточні вимірювання. До них можна віднести:

- методи контролю переміщень, засновані на принципах геометричної оптики
- інтерференційні методи контролю переміщень, засновані на будіванні інтерференційної картини і подальшому її дослідженні.
- Растрові методи контролю переміщень на накладанні вимірювального і індикаторного растрів.

Розглянемо більш детально кожен із методів, виявим їх переваги та недоліки [9].

1.4.1 Растрові методи контролю лінійних мікропереміщень

Фотоелектричні растрові перетворювачі лінійних переміщень є прецензійними вимірювальними пристроями з цифровим виходом. Основним елементом будь-якого вимірювального пристрою є міра, яка дозволяє

відтворювати одиниці виміру, а також їх кратні і дробові значення. Мірою фотоелектричних растрових перетворювачів є вимірюючий растр.

Растр являє собою сукупність подібних елементів, утворюють періодичну структуру і впливають на потік променевої енергії як єдине ціле. В залежності від характеру впливу на променевий потік розрізняють растри пропускаючі і відображаючі. Пропускаючі і відображаючі растри, змінюючи амплітуду падаючої хвилі випромінювання, називаються амплітудними растровими решітками. Растри, дії яких на падаючу хвилю зводиться в основному до зміни фазових співвідношень, називаються фазовими растровими решітками. Геометрична структура елементів, утворюючих растр, може бути різною.

Основними оптичними характеристиками вимірювальних растрів є період і коефіцієнт заповнення. Період растра – це лінійна або кутова відстань між осями двох сусідніх елементів растра. Растри іноді характеризуються частотою. Частота – це величина, протилежна періоду, що показує скільки штрихів вкладається в одиниці довжини.

Коефіцієнт заповнення растра характеризується відношенням ширини прозорого елемента растра до періоду. Зазвичай в перетворювачів застосовуються растри, в яких ширина прозорого штриха рівна ширині не прозорого, тобто растри з коефіцієнтом заповнення рівним 0,5.

Растрове сполучення, у якого коефіцієнти заповнення для вимірювального і індикаторного растрів різні, називається ноніусним.

В склад фотоелектричного растрового перетворювача входять растрова вимірююча ланка, складається з рухомого вимірюючого растра і не рухомого індикаторного растра; блок підсвічування растрової ланки; блок фотоприймачів, приймаючих випромінювання, промодульовані растровою ланкою; електронний логічний блок, здійснює остаточну обробку інформації про вимірюючу величину.

Растрова вимірююча ланка здійснює масштабне перетворення вимірювального переміщення. Невеликі переміщення вимірювального растра перетворюються в суттєво великі переміщення комбінаційних смуг, утворюючих сполучення растрів.

Переміщення комбінаційних смуг перетворюються фотоприймачем в електричні сигнали, пропорційні інтенсивності світлового потоку, що пройшов через растрове сполучення. В даний час відомо достатньо велике число різних видів фотоелектричних растрових перетворювачів, що розрізняються за своїми структурними схемами.

Застосування растрових сполучень, утворюють комбіновані муарові смуги, для цифрового виміру переміщень методом послідовного рахунку ґрунтується на наступному явищі. Якщо одна із решіток рухається в особистій площині перпендикулярно своїм штрихам, а інша нерухома по відношенню до наглядача, то муарові смуги також переміщуються, при чому кількість смуг, які проходять через будь-яку точку растрового поля, дорівнює числу штрихів рухомої решітки, які пройшли цю ж саму точку. Якщо одна із решіток жорстко прикріплена до деталей, переміщення якої потрібно виміряти, а інша нерухома, то, рахуючи число смуг, що проходять будь-яку фіксовану точку, можна визначити переміщення рухомої деталі, вираженої через число кроків растрової решітки. В сучасних модифікаціях фотоелектричного растрового методу виміру переміщень використовуються ПЗС-фотоприймачі з додатковим фоточутливим елементом для отримання опорного сигналу .

Недоліками цього методу контролю є сумірність кроку решітки з довжиною хвилі випромінювання, технологічні труднощі виготовлення [5].

1.4.2 Методи контролю лінійних мікропереміщень, засновані на принципах геометричної оптики

Методи контролю переміщення, основані на принципах геометричної оптики припускають оптичну проекцію об'єкта в плоскість

фотоелектричного пристрою і наступне його електронне сканування. Отриманий сигнал потім відцифровується і обробляється. Завдяки «жорсткій» геометрії приладу кожний з цих відліків з високою точністю характеризує просторовий розподіл інтенсивності світла в зображенні об'єкта.

Переміщення в просторі предметів пов'язано з переміщенням в просторі зображення наступною формулою:

$$y = \frac{1}{\beta_0} y', \quad (1.1)$$

де β_0 - лінійне збільшення інформаційно-вимірювальної системи;

y – переміщення в просторі предметів;

y' – переміщення в просторі зображення.

Тоді похибка контролю переміщень буде виражатись формулою:

$$\Delta y = \frac{1}{\beta_0} \Delta y' \quad (1.2)$$

Отже, похибка цього метода контролю переміщень залежить від точності вимірювання переміщення в області фотоприймача і від збільшення. Чим точніше вимірюється переміщення об'єкта в просторі фотоприймача, і чим більше збільшення, тим точніший результат вимірювання дійсного переміщення. При малих відстанях від об'єкта до оптико-електронного перетворювача ці умови виконуються.

Під малими відстанями розуміють такі відстані, які в багато разів перевищують фокусну відстань об'єктива оптико-електронного перетворювача.

При контролі переміщень задовольнити цим двом суперечливим умовам на практиці дуже важко. В фотоелектричних мікроскопах підвищення точності контролю переміщення в просторі фотоприймача веде до необхідності підвищення коефіцієнта лінійного збільшення ($\beta_0 > 10^x$), це, в свою чергу, обмежує відстань від об'єкта вимірювання до фотоелектричного

мікроскопа. В тіньових вимірювальних системах збільшення відстані супроводжується зменшенням коефіцієнта лінійного збільшення ($\beta_0 \approx 1^x$), що приводить до збільшення похибки контролю, пов'язаної з визначенням границь вимірюваного об'єкта. В телескопічних системах, де відстань до об'єкта вимірювання перевищує фокусну відстань, використовується мале лінійне збільшення ($\beta_0 \ll 1^x$), при цьому отримують малу похибку. Але такі оптичні системи не придатні для побудови оптико-електронних перетворювачів, так як не створюють дійсного зображення [8].

На рисунку 1.5 представлена схема простого фотоелектричного мікроскопа. Випромінювач від джерела проходить через світофільтр, оптичну систему і фіксується на фотоприймачі.

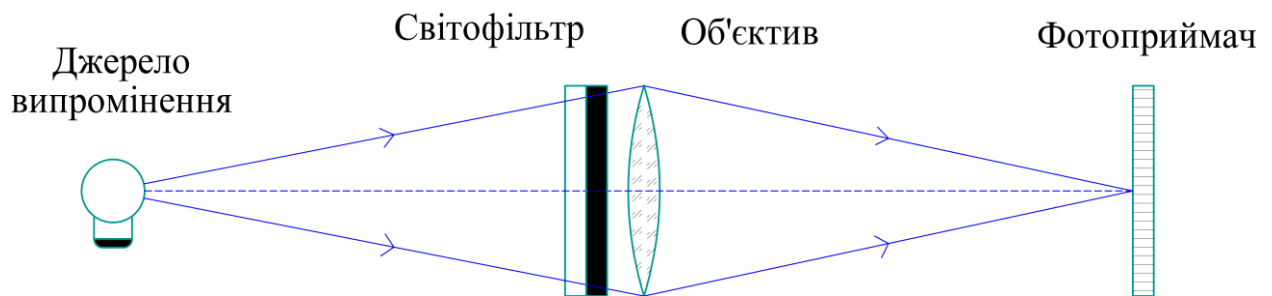


Рис. 1.5 - Схема фотоелектричного мікроскопа

Масштаб зображення для систем, у яких предмет і зображення знаходяться на кінцевій відстані, визначається лінійним збільшенням β_0 по формулі

$$\beta_0 = \frac{y}{y'} = -\frac{f}{z} = \frac{f'}{z'}, \quad (1.3)$$

де f , f' - фокусні відстані об'єктива.

Таким чином, масштаб зображення характеризується лінійним збільшенням і залежить від фокусної відстані. При одній і тій же відстані до об'єкта лінійне збільшення тим більше, чим більша фокусна відстань

об'єктива. Чутливість фотоелектричного пристрою визначається за формулою:

$$S = \frac{dy'}{dy} = -\frac{d(\beta_0 y)}{y} = \beta_0 \frac{y}{y} = \beta_0, \quad (1.4)$$

Фотоелектричні перетворювачі, в яких проєктоване оптичною системою зображення об'єкта перетворюються в електричний сигнал фотоприймачем, мають відносно малу інерційність і високу чутливість. Фотоелектричні вимірювальні системи відрізняються відносною простотою, надійністю, забезпечують автоматизацію вимірювання зручні в експлуатації, але мають вагомий недолік. Чутливість приведенного фотоелектричного пристрою залежить від лінійного збільшення: чим більше лінійне збільшення, тим більша чутливість даного пристрою, відповідно, чим менше лінійне збільшення, тим менша чутливість, а значить і точність вимірювань. Велике значення коефіцієнта лінійного збільшення обмежує можливість збільшення відстані від об'єкта дослідження до фотоелектричного мікроскопа [8].

У вимірювальних системах, побудованих на методі тіньової проєкції, здійснюється проєкціювання зображення об'єкта в плоскість фотоприймача і подальше його електронне сканування. Необхідні переміщення визначаються шляхом математичної обробки результатів вимірювань в відповідності з прийнятим алгоритмом. При цьому можна добитися збільшення відстані від об'єкта дослідження до об'єктива оптико-електронного перетворювача. Коефіцієнт лінійного збільшення в таких системах становить $\beta_0 \approx 1^x$.

Схема вимірювальної системи, побудованої на методі тіньової проєкції, приведена на рисунку 1.6. Вимірювач включає в себе оптичний і електронний блок.

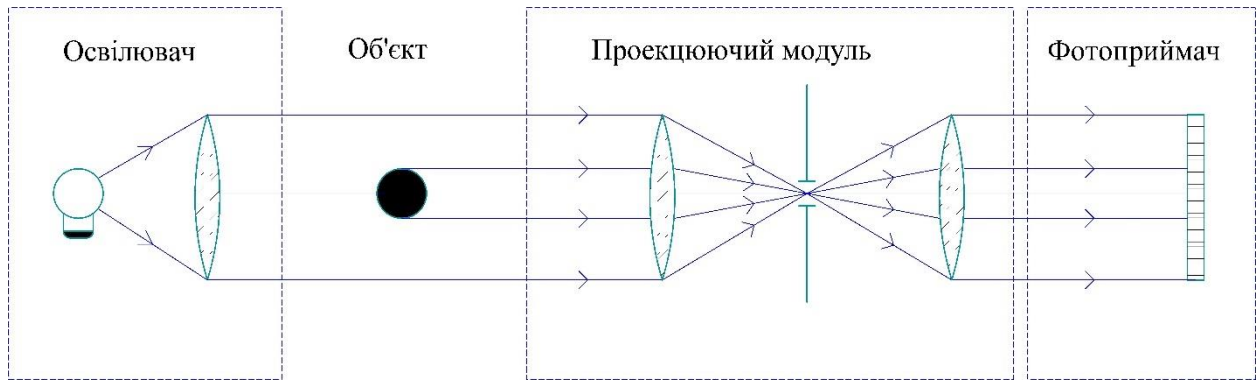


Рис. 1.6 – Схема приладу, заснованого на тіньовому методі контролю

Головним недоліком даного методу являється розкид чутливості елементів ПЗЗ – фотоприймача, що являється перешкодою для визначення границь тіньової області. Висока похибка контролю виникає із-за великої зони невизначеності максимуму розподілу освітленості.

Для підвищення точності контролю використовують різноманітні методи обробки вимірюваного сигналу, що знижує продуктивність контролю переміщень. Методи центра тяжіння і медіанний метод допускають при реалізації малий об'єм необхідних обчислень, але мають велику похибку; метод апроксимації екстремальними функціями (наприклад, апроксимація функцій Гауса) має меншу похибку, але потребує більшого об'єму обчислень. Принципово іншим способом підвищення точності контролю без втрати продуктивності являється застосування міри в формі двох вузьких світових полос з коефіцієнтом заповнення 0,75. Позитивний технічний результат досягається за рахунок значного зменшення зони невизначеності до одного фоточутливого елемента [10].

1.4.3 Інтерференційні методи контролю лінійних мікропереміщень

В наш час інтерферометри з лазерним джерелом випромінювання досить добре розроблені і володіють універсальністю, що являється причиною їх широкого застосування. Процес контролю переміщень інтерференційним методом заключається в визначенні числа довжин хвиль (або часткою довжин хвиль) випромінювання лазера, які укладаються на

вимірювальному відрізку, і числа інтерференційних полос, які проходять через поле зору реєструючого приладу при переміщенні об'єкта.

Для отримання метричних одиниць необхідно отриманий результат помножити на значення довжини хвилі використовуваного лазера.

В якості оптичного пристрою найбільш широко використовується інтерферометр Малькельсона і його модифікації. На рисунку 1.7 представлена спрощена функціональна схема інтерференційного вимірювача.

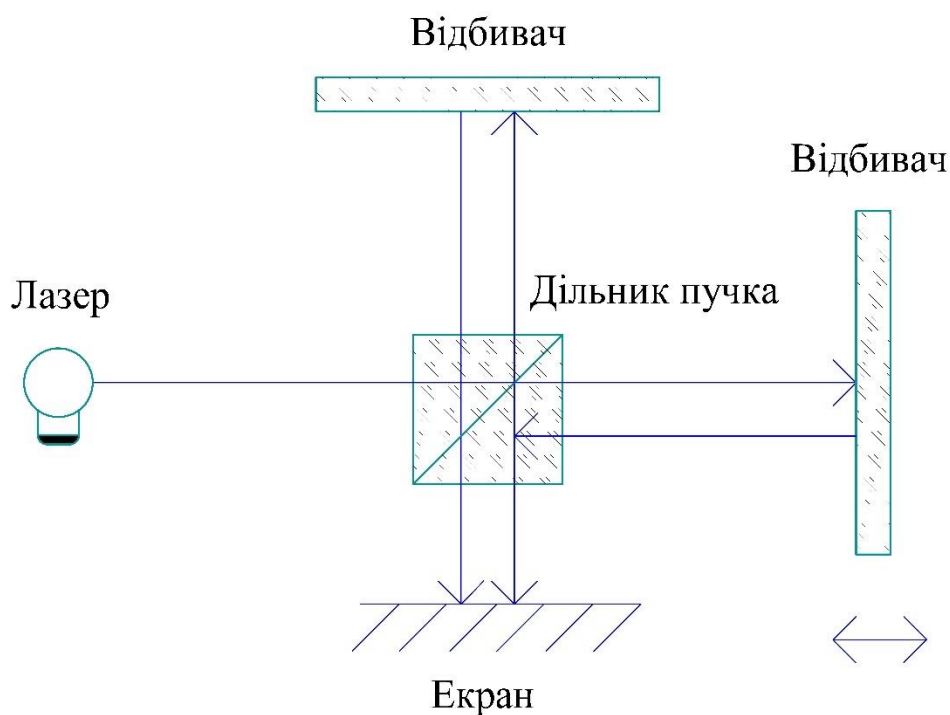


Рис. 1.7 – Схема лазерного інтерференційного вимірювача

Для лазерних джерел умовою гарної видимості інтерференційної картини може бути дотримано в діапазоні до декількох десятків кілометрів, а висока якість випромінювання забезпечить при цьому достатньо великий рівень сигналу в інтерференційних максимумах. На практиці основним фактором, обмежуючим діапазон вимірюваних переміщень і визначаючим достатню точність вимірювань являється зміна оточуючих умов на довжину хвилі випромінювання і контрольований об'єкт, що існує для контролю переміщень на великих відстанях.

До плюсів метода лазерної інтерференції можна віднести можливість вимірювання переміщень з точністю до часток світлової хвилі, але при цьому такі системи володіють високою чутливістю до оптичних шумів і низькою продуктивністю при підрахунку періодів. При когерентному джерелі випромінення суттєвою перешкодою являється багатопроменева інтерференція на захисному склі багатоелементного фотоприймача, при цьому корисний сигнал моделюється перешкодою. Також слід зазначити, що використання лазерних інтерферометрів для вимірювання на великих відстанях обмежено конструктивними розмірами, так як габаритні розміри лазерного інтерферометра прямо пропорційні відстані до об'єкта дослідження. Це в свою чергу ускладнює схемотехнічні вирішення при виготовленні оптичних ланок і підвищує вартість системи [11].

1.5 Огляд приладів та систем для визначення геометричних параметрів у мікронному діапазоні

1.5.1 Вимірювальний мікроскоп ДІП-6У

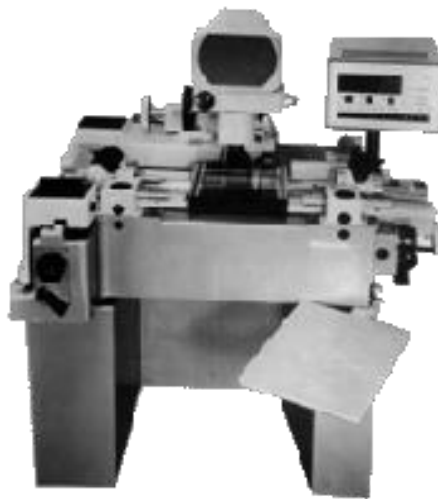


Рис. 1.8 – Вимірювальний мікроскоп ДІП-6У

Призначений для вимірювання лінійних і кутових розмірів виробів координатним методом за допомогою оптичної візирної системи. Зокрема, на

приладі можна вимірювати різьбові вироби, ріжучий інструмент, поздовжні шаблони і лекала, кулачки, конуси, мітчики, різьбонарізні гребінки, діаметри малих отворів та ін. За отриманими координатами точок координатно-оптичним пристроєм визначаються діаметри, радіуси, центру кіл, точки перетину, відстані, кути.

Вхідний до складу приладу обчислювальний комплекс дозволяє на підставі отриманих координат точок (до 99) геометричних елементів контрольованого виробу провести розрахунок великої кількості креслярських розмірів (діаметрів, радіусів, центрів кіл, точок перетину, відстаней і кутів) і відхилень розташування (відхилення від паралельності, перпендикулярності і нахилу, позиційне відхилення від симетричності) поверхонь.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики ДИП-6У [12]

Межі вимірювань	200x100		мм
Діапазон вимірювання кутів	0 - 360		град
Допустима похибка вимірювань проекційним методом	лінійних розмірів	$+ (1,0 + L/200)$	мкм
	діаметрів гладких циліндрів в центрах	$+ (4,0 + L/70)$	
	середніх діаметрів різьби	$+ (3 + 2/\sin (a / 2) + L/100)$	
	кроку різьблення	$+ (1 + 2/\cos (a / 2) + L/30)$	
Габаритні розміри	вимірювального мікроскопа	1400x1300x1000	мм
	підставки	985x730x 630	
Маса	вимірювального мікроскопа	460	кг
	підставки	142	

Де, L – вимірюваний розмір в міліметрах; а – кут профіля різьби в градусах; Р – крок різьби в міліметрах [12].

1.5.2 Універсальний вимірювальний мікроскоп УИМ- 21



Рис. 1.9 – Універсальний вимірювальний мікроскоп УИМ- 21

Мікроскоп універсальний вимірювальний УИМ- 21 призначений для вимірювання лінійних і кутових розмірів різноманітних виробів в прямокутних і полярних координатах. Зокрема, на мікроскопі можна проводити вимірювання всіляких різьбових виробів, різального інструменту, профільних шаблонів і лекал, кулачків, конусів, мітчиків, різенарізальних гребінок, а також вимірювання радіусів заокруглень і відстаней між осями отворів різної форми.

За родом робіт, які можна виконувати на мікроскопі, він є універсальним в повному розумінні слова. Універсальний вимірювальний мікроскоп застосовується на заводах машинобудівної та приладобудівної промисловості, в науково-дослідних інститутах [13].

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики УИМ- 21

Межі виміру довжин	в поздовжньому напрямку	200	мм
	в поперечному напрямку	100	
Межа вимірювання кутів	360		град
Ціна найменшої поділки спірального окулярного мікрометра	0,001		мм
Габаритні розміри	1145x1060x705		мм
Маса мікроскопа	414		кг

1.5.3 Оптиметр горизонтальний ИКГ

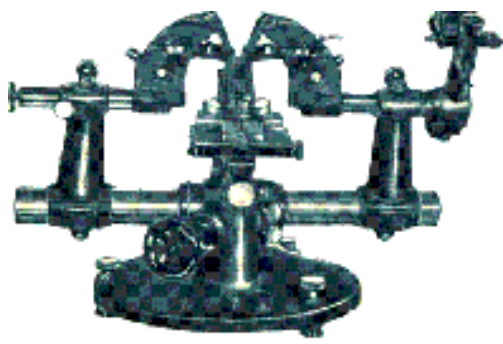


Рис. 1.10 – Оптиметр ИКГ

Оптиметр на горизонтальному штативі ИКГ призначається для вимірювання зовнішніх і внутрішніх лінійних розмірів методом порівняння вимірюваного виробу з кінцевими мірами, калібрами або деталями - зразками. Зокрема, на приладі можуть проводитися вимірювання кінцевих плоскопаралельних мір довжини (вимірювальних плиток), калібрів, діаметрів кульок, внутрішніх діаметрів калібрів і виробів і т.д. [14].

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики оптиметра ИКГ

Найбільша довжина вимірюваного виробу	300	мм
Межі виміру внутрішніх розмірів	13,5-150	мм
Ціна поділки шкали	0,001	мм
Витрата шкали	+ 0,1	мм
Похибка показань при вимірюванні зовнішніх розмірів	+0,0003	мм
Похибка показань при вимірюванні внутрішніх розмірів	$\pm 0,001$	мм
Габарит приладу	600 x 400 x 340	мм
Вага приладу	40	кг

1.5.4 Мікрометр МКЦ-25

Мікрометр призначений для вимірювання лінійних розмірів. В основі конструкції мікрометра лежить мікрометрична пара гвинт - гайка. Результат

вимірювань знімається з РК-дисплея. Цифровий відліковий пристрій визначає не тільки точність приладу, але й наявність інших функцій.



Рис. 1.11 – Мікрометр МКЦ-25 [15]

Електронні цифрові мікрометри здатні проводити вимірювання в міліметрах і дюймах, а так само мають функцію установки нуля. Ця функція дозволяє електронним мікрометрам здійснювати вимірювання не тільки в абсолютній, а й у відносній системах відліку.

На РК-дисплеї мікрометра відображається значення отриманого результату вимірювання, і одиниці виміру, в яких отримано результат. При цьому, так само відображається і символ системи відліку - абсолютна або відносна [15].

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики мікрометра МКЦ-25

Діапазон вимірювання	0-25	мм
Ціна поділки	0.001/0,00005	мм/дюйм
Похибка	± 0.002	мм

1.6 Огляд приладів та систем для визначення переміщень у мікронному діапазоні

1.6.1 Лазерна вимірювальна система ЛИС-01М

Лазерна вимірювальна система ЛИС-01М призначена для вимірювання лінійних переміщень при повірці і калібруванні високоточних засобів вимірювань лінійних переміщень і систем прецизійного позиціонування і

сканування, ємнісних та індуктивних вимірювальних перетворювачів, лазерних вимірювачів нанопереміщень, первинних перетворювачів акустико-емісійних систем неруйнівного контролю [16, 17].

Принцип дії ЛИС-01М полягає в порівнянні вимірюваної зміни довжини оптичного шляху з довжиною хвилі частотно-стабілізованого гелій-неонового лазера. Порівняння реалізується за допомогою двопроменевого лазерного Гете-родинного інтерферометра, в якому виробляється перетворення, модуляція оптичного випромінювання, формування опорного і вимірювального каналів і подальше суміщення випромінювання на змішувальному елементі. Функціональна схема ЛИС-01М представлена на рисунку 1.12.

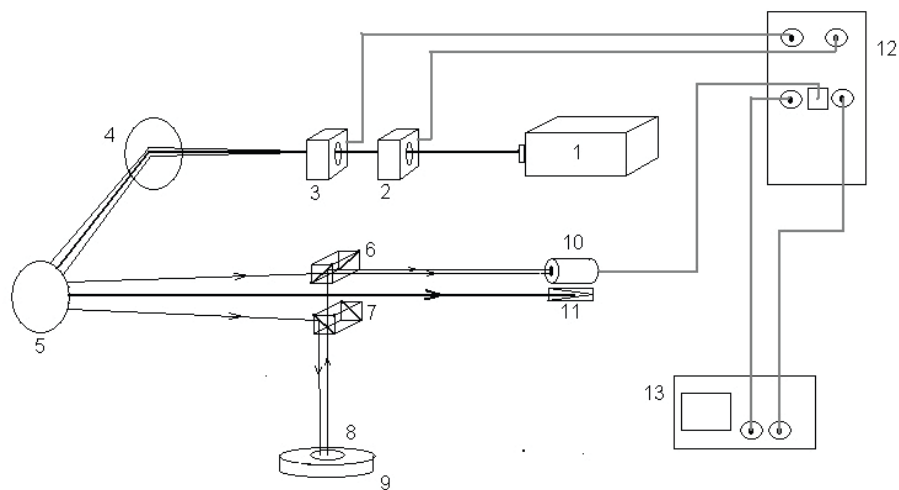


Рис. 1.12 – Структурна схема лазерної вимірювальної системи ЛИС-01М (1 - лазер ЛГН - 302; 2 і 3 - акустооптичні модулятори; 4,5 - дзеркала; 6,7 - світлороздільні (змішувальні) елементи; 8 - фазовий об'єкт з відбиваючим зеркалом; 9 - столик; 10 – фотоприймальний пристрій (ФПП); 11 – поглинач пучка нульового порядку дифракції; 12 - ЕФС; 13 – цифровий осцилограф)

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики ЛИС-01М

Діапазон вимірювань лінійних переміщень	$10^{-9} \dots 10^{-3}$		м
Границі допустимої абсолютної похибки вимірювання лінійних переміщень	в діапазоні $(10^{-9} - 10^{-6})$ м	$\pm 0,5 \cdot 10^{-9}$	м
	в діапазоні $(10^{-9} - 10^{-6})$ м	$\pm 0,3 \cdot 10^{-9}$	
Діапазон вимірювань вібропереміщень	$(10^{-9} - 10^{-4})$		м
Границі допустимої відносної похибки вібропереміщень, не більше	± 2		%
Дискретність відліку	$\pm 1 \cdot 10^{-10}$		м
Швидкодія, не більше	$\pm 10 \cdot 10^{-6}$		с
Габаритні розміри	Оптико-механічного блока	320x180x70	мм
	Електронно-фазометричної системи	450x270x180	
Маса	Оптико-механічного блока	7,5	кг
	Електронно-фазометричної системи	3	
Робочий діапазон температур	20 ± 1		°C
Відносна вологість	65 ± 15		%
Атмосферний тиск	760 ± 30		мм.рт.ст
Напруга живлення	220 ± 11		В
Споживча потужність	500		Вт

1.6.2 Оптико-електронний вимірювач мікропереміщень ОЕВМ

Оптико-електронний вимірювач мікропереміщень призначений для безконтактного виміру розмірів, переміщення, положення, профілю поверхні

виробів і деформації пластин кремнію в технології великих і надвеликих інтегральних схем (BIC і HBIC VLSIs) .



Рис. 1.13 – Оптико-електронний вимірювач мікропереміщень ОЕВМ [18]

Оптико-електронний вимірювач мікропереміщень ОЕВМ включає в себе:

- напівпровідниковий лазер потужністю 5 мВт з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 670$ нм, $\lambda = 670$;
- конденсорну лінзу, що забезпечує фокусування лазерного променя на поверхню вимірюваного об'єкта;
- об'єктив з фокусною відстанню 16мм;
- коригуюче дзеркало;
- ПЗС лінійку;
- мікропроцесорний пристрій обробки вимірювальної інформації та управління ПЗС лінійкою і напівпровідниковим лазером.

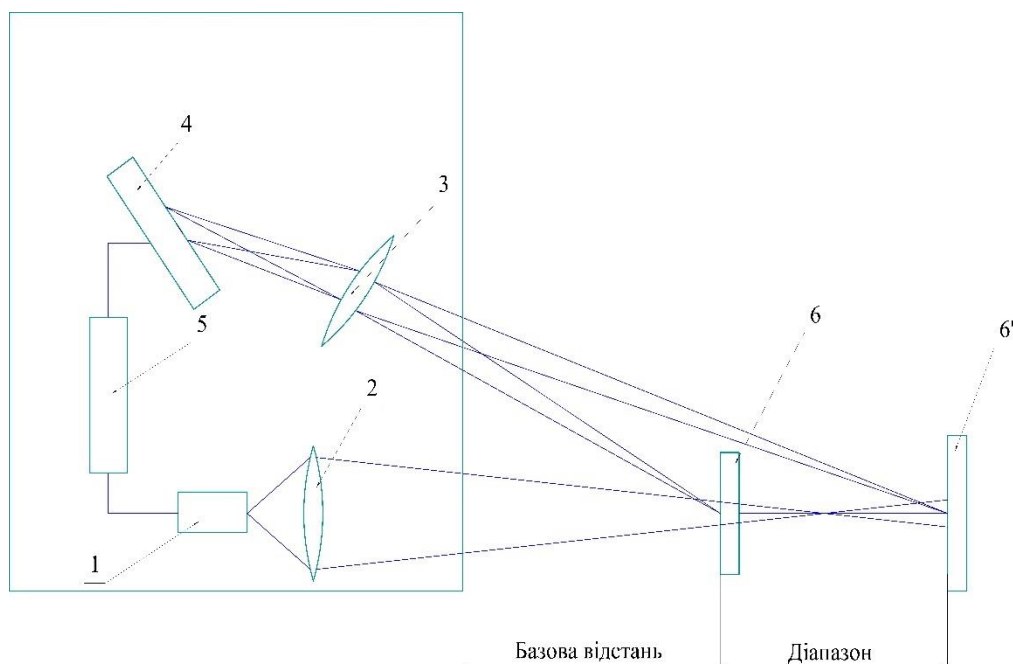


Рис. 1.14 – Структурна схема ОЕВМ

В основу роботи ОЕВМ покладений принцип оптичної трангульції. Випромінювання напівпровідникового лазера 1 фокусується об'єктивом 2 на об'єкті 6. Розсіяне на об'єкті випромінювання об'єктивом 3 збирається на CMOS-лінійці 4. Переміщення об'єкта 6-6' викликає відповідне переміщення зображення. Процесор сигналів 5 розраховує відстань до об'єкта по положенню зображення світової плями на лінійці 4 [18].

1.6.3 Датчик нанопереміщення серії IDS-4



Рис. 1.15 – Датчик нанопереміщення серії IDS-4 [19]

Технічні характеристики IDS-4:

- ▪ порогова чутливість – 0,05 нм;
- ▪ малі габарити;
- ▪ автоматична реєстрація максимальної швидкості переміщення;
- ▪ швидкість переміщення зразка - до 1 мм/с;
- ▪ частота вимірів - не менше 6 КГц;
- ▪ автоматичне налаштування;
- ▪ можливість зміни еталонних джерел довжини хвилі;
- ▪ внутрішня термокомпенсація;
- ▪ інтерфейс зв'язку - USB 1.1, SPI;
- ▪ живлення - 5В USB.

Датчик автоматично відстежує проекцію найкоротшої відстані від центру приймача до площини дзеркала на вісь вимірювального променя і передає інформацію про відносне переміщення за запитом з персонального комп'ютера (ПК) за допомогою інтерфейсу USB. Для інтегрування датчика в власний електронний модуль є можливість безперервного, з частотою 6 КГц, отримання інформації про переміщення по інтерфейсу SPI, роз'єми якого розташовані на інтерфейсній платі датчика. IDS-4-LD може живитися як по інтерфейсу USB так і від зовнішнього стабілізованого джерела живлення +5В.

Датчик автоматично реєструє рівень сигналу і максимальну швидкість переміщення. Оптична схема IDS-4-LD являє собою інтерферометр Майкельсона, елементи якої виключають появу паразитних відблисків.

Як джерело випромінювання може використовуватися багаточастотний або одночастотний напівпровідниковий лазер у корпусі діаметром 5.6 мм або зовнішнє джерело еталонного випромінювання, що підключається до датчика за допомогою роз'єму FC. Діапазон вимірюваних переміщень IDS-4-LD залежить від довжини когерентності вибраного джерела і точності настройки вимірювальної установки і може досягати 1 м. Для проведення вимірювань

на об'єкті необхідно розмістити дзеркало діаметром не менше 9 мм і не допускати його відхилення під час вимірювання [19].

1.6.4 Скануюча зондова лабораторія Ntegra Prima

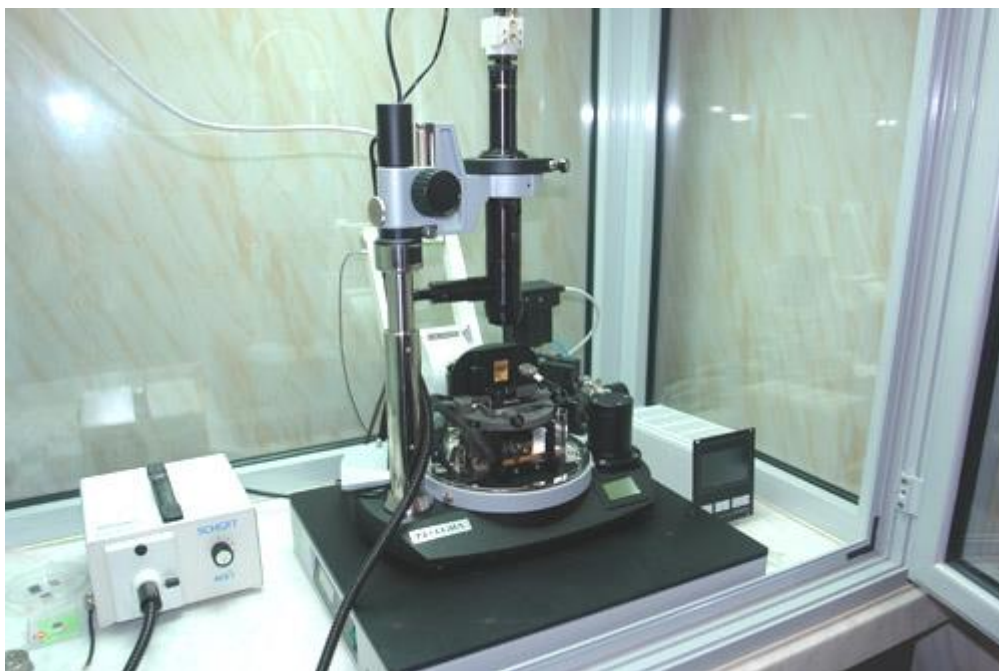


Рис. 1.16 – Скануюча зондова лабораторія Ntegra Prima [20]

В лабораторії Ntegra Prima можна проводити дослідження фізико-хімічних властивостей поверхні нанооб'єктів і наноструктур за допомогою сучасних методів зондової мікроскопії. Точність вимірювання переміщення (система сканування) по вертикалі 0,1 нм, в латеральному напрямку - 1 нм.

Модульна структура дозволяє проводити дослідження зразків в рідині в контрольованому газовому середовищі і при температурах до 150 С.

Можливість роботи в контактному, переривчасто-контактному і безконтактному режимах. Вимірювання пружних властивостей об'єктів на наномасштабі. Дослідження і модифікація електричних (провідність, ємність, мікроскопія) і магнітних властивостей об'єктів.

Можливість реалізації складних багатопрхідних методик і власних алгоритмів обробки даних [20].

1.7 Аналіз шляхів вдосконалення телевізійних засобів вимірювання

1.7.1 Застосування та класифікація телевізійних засобів

Автоматизовані телевізійно-обчислювальні комплекси вирішують завдання вимірювання геометричних розмірів, кутів переміщень, координат та інших параметрів протяжних і малорозмірних об'єктів з великою точністю. Збільшення потреби в телевізійних засобах спостереження пов'язано з їх властивостями, до яких відносяться: зручність об'єднання телевізійного датчика практично з будь-яким комп'ютером; високу швидкодію телевізійних систем, що дозволяє обробляти сигнали від нерухомих, малорухомих і швидко рухаються, як у реальному, так і зміненому часу. Телевізійне зображення істотно відрізняється від вхідного оптичного зображення - до нього внесено значні спотворення. У той же час ми в основному не помічаємо цих спотворень. ТВ-зображення може здаватися досить високоякісним, що свідчить про виконання умови фізіологічно точного відтворення. Технічно це досягається вибором відповідного телевізійного стандарту, при якому спотворення, внесення в зображення, стають малопомітними внаслідок обмеженої контрастної чутливості, роздільної здатності і інерційності зорового апарату людини.

В даний час телевізійна техніка розвивається за двома основними напрямками. Одним з яких є мовне телебачення, другий отримав назву прикладного телебачення, під яким розуміється використання телевізійних методів і засобів в народному господарстві, наукових дослідженнях, космічного зв'язку, військовій справі і т. д. Слід зазначити, що протягом всієї історії обидва напрямки розвивалися в тісній взаємодії між собою. Однак у силу специфіки вирішуваних завдань вимоги до системам мовного і прикладного телебачення можуть істотно відрізнятися. Основна вимога до мовним системам полягає у відтворенні на телевізійному екрані зображень, що забезпечують необхідні умови для художнього сприйняття глядачем переданої сцени. І тут на перший план виступає проблема якості

відтвореного зображення. Вимоги, які пред'являються системам прикладного телебачення, випливають з їх конкретного призначення, яке може бути як вузько спеціалізованим.

Системи прикладного телебачення за призначенням і принципом побудови діляться на дві основні групи. До першої групи відносяться спостережні системи, звані також оглядово-пошуковими або інформаційними системами. Вони призначені для спостереження за загальною обстановкою всередині заданого простору, обмеженого полем зору об'єктива, а також візуального або автоматичного пошуку, виявлення й упізнання цікавлять оператора об'єктів.

До другої групи належать телевізійні вимірювальні системи (ТВС), які слугують для контролю та вимірювання окремих параметрів об'єкта. Як правило, ТВС, при функціонуванні в автоматичному режимі, попередньо виконують завдання виявлення і розпізнавання об'єкта з метою подальшого вимірювання його параметрів. Основні різновиди телевізійних систем представлені на рисунку 1.17.



Рисунок 1.17 – Класифікація телевізійних систем

У стандартних телевізійних системах (ТВС) відеоспостереження, контролю і визначення параметрів об'єктів в якості датчиків сигналів в даний час найчастіше застосовуються відеокамери на базі перетворювачів із зарядним зв'язком (ПЗЗ). З виходу ПЗЗ надходить великий обсяг

відеоінформації, яка для телевізійних автоматичних систем (ТАС) виявлення, спостереження, вимірювання координат та інших параметрів об'єктів може бути надмірною. Максимальна швидкодія, точність та інші характеристики ТВС обмежені інерційністю ПЗЗ з накопиченням зарядів, низькою частотою зчитування відеоданих, що не перевищує частоту кадрів, і малим контрастом зображення в складних умовах спостереження. Для зменшення надлишкової відеоінформації застосовуються спеціальні засоби цифрової обробки сигналів та зображень, що призводить до значного збільшення апаратних, тимчасових витрат і вартості системи [22].

1.7.2 Виявлення і розпізнавання об'єктів

Для поліпшення характеристик ТАС в режимах виявлення сигналів можуть застосовуватися програмно-керовані адаптивні розгортки, розмір, форма і швидкість сканування яких залежать від параметрів зображень об'єктів і умов роботи системи. Достовірність виявлення і розпізнавання об'єктів збільшиться в результаті застосування адаптивного двоетапного методу виявлення об'єктів. На першому етапі відеосигнали, отримані в результаті огляду і сканування поля зору ТАС, порівнюються з граничним рівнем першого вирішального пристрою. Після перевищення сигналом вхідного порогового рівня приймається рішення про попереднє виявлення об'єкта, і ТАС переходить в режим аналізу сигналу, вимірювання координат та інших параметрів зображення. Величини раstra огляду і поля зору ТВ датчика автоматично зменшується до розмірів виявленого зображення, змінюються частота і траєкторія сканування раstra. Центри раstra і рухомого зображення суміщаються за допомогою програмно-керованих розгорток. Накопичені за обраний час аналізу сигнали порівнюються з граничним рівнем другого вирішального пристрою. Якщо рівень другого порогового пристрою перевищується, то приймається рішення про правильне виявленні сигналу і ТАС може переходити в режим розпізнавання, стеження, визначення розмірів, форми, яскравості, швидкості, траєкторії руху та інших

параметрів об'єкта. Якщо вихідний поріг не перевищується, то приймається рішення про виявлення перешкоди в результаті помилкової тривоги і продовжується сканування поля огляду ТВ датчика. Поліпшення відношення сигналу до шуму за час аналізу сигналу зменшує ймовірність пропуску об'єктів при постійній вірогідності помилкової тривоги і істотно підвищує вірогідність виявлення і розпізнавання об'єктів. Максимальна частота кадрів залежить від кількості рядків растра знаходження і для високошвидкісних камер VS- FAST (НПК "Відеоскан") при растрі від 25 до 10 рядків може дорівнювати відповідно від 10000 до 25000 кадрів в секунду [23].

1.7.3 Стеження і вимір координат об'єктів

У багатоелементних перетворювачах миттєвої дії з довільною вибіркою сигналів застосовуються методи зменшення надлишкової відеоінформації та збільшення швидкодії ТАС в самих процесах виявлення, стеження і вимірювання параметрів об'єктів. Найбільш ефективно ці методи можуть використовуватися в ТВ датчиках на базі компліментарних «метал-оксид» напів-провідникових (КМОП) перетворювачів, в яких заряди елементів не переносяться як в ПЗС -матриці, а посилюються КМОП - транзисторами, перетворюються в цифрову форму і зчитуються програмно-керованими електронними затворами елементів. На основі КМОП - перетворювачів створюються ТВ датчики з керованими режимами накопичення і вибірки сигналів, що представляють собою об'єднання на одному кристалі матриці світлочутливих елементів і модулів їх комутації, що формують розгортки адаптивних растрів виявлення і стеження за об'єктами. Підсилювачі на КМОП- транзисторах можуть використовуватися як ключі або електронні затвори, які управляють експозицією матриці, накопиченням зарядів, передачею їх в аналогову пам'ять, а також аналогово-цифровим перетворенням і зчитуванням оцифрованих сигналів від кожного елемента. Суміщені з перетворювачем програмно-керовані логічні схеми дозволяють змінювати частоту, траєкторію сканування, розміри растрів виявлення і

стеження. Підсумовування отриманої в цифровій формі помилки розбіжності між центрами зображення і растру дозволяє привести до їх суміщення та стеженню за об'єктом по полю зору. Можливість зменшення розмірів растра або вікна сканування в режимах огляду поля зору і стеження за зображенням значно збільшує максимальну частоту сканування, швидкодію і точність вимірювань параметрів. Застосовувані в даний час системи швидкісного відеозапису Fastvideo - 500TS (НВО "Астек"), підключення через інтерфейс Camera Link до комп'ютера, дозволяють реєструвати швидкопротікаючі процеси з частотою до 500 повних кадрів в секунду. У режимі стеження і вимірювання параметрів малорозмірних швидкорухомих об'єктів або швидкопротікаючих процесів максимальна частота сканування може збільшуватися до 65000 кадрів в секунду при розмірах растра до 30x30 елементів по горизонталі і вертикалі і до 500000 кадрів в секунду при розмірах растра до 10x10 елементів, що дозволяє поліпшити продуктивність ТАС на три-чотири порядки в порівнянні з традиційними ТВС.

Розробка телевізійних вимірювальних систем на основі матричних приймачів випромінювання з електронним скануванням і довільною вибіркою елементів дозволяє створювати принципово нові пристрої ТАС на базі твердотільних вимірювальних «Систем на кристалі». Визначення координат та інших параметрів зображень в малорозмірних адаптивних растрах виявлення і стеження може істотно підвищити швидкодію телевізійних вимірювальних систем і надати допомогу подальшого розвитку сучасних високопродуктивних методів отримання відеоінформації [23].

1.7.4 Оцінка похибки ТВС при визначення геометричних параметрів

Для оцінки похибки вимірювання систем формування зображення найбільш розповсюдженим є геометричний підхід. В його основу покладено поняття елементу розкладу зображення (ЕРЗ), як частини СЕП, у межах якої просторова функція інтегрується.

Використовуючи цей підхід необхідно приймати, що похибка вимірювання δ не перевищує значення лінійного розміру Δ по відповідній координаті. Цим підходом користуються переважно для отримання оціночних значень похибки вимірювання. Отже, геометричний підхід годиться для використання в лабораторних умовах, коли об'єктом виступають еталонні атестовані джерела. В той же час до оцінки похибки вимірювання, крім геометричного, можуть бути застосовані інші підходи, зокрема, просторово-частотний. Але літературні джерела, де використовується просторово-частотний підхід до визначення роздільної здатності, не враховують особливостей формування порогового контрасту та умов реальної задачі. Ця ж невизначеність у заданні порогового контрасту виникає також при застосуванні просторово-частотного підходу до оцінки похибки вимірювання [24].

1.8 Порівняльний аналіз оптичних методів вимірювання розмірів шкал та сіток

Останнім часом у біомедицині, фармацевтиці, електроніці, оптоелектроніці, хімічній і керамічній промисловостях досліджуються наночастинки зі щораз меншими розмірами і з різноманітним складом матеріалів. Дуже важливими характеристиками для кінцевого споживача є розмір частинки і розподіл розмірів частинок цих матеріалів, оскільки вони впливають на ключові колоїдні властивості, такі, як площа поверхні, густина матеріалу, в'язкість, текучість, швидкість реакції та хімічна активність, стабільність емульсій і суспензій, абразивність сухих порошків, колір і вигляд колоїдних фарб і покриття паперу, міцність кераміки. Не менш важливим знання цих характеристик є і під час формування матеріалу, оскільки воно дає можливість точно контролювати виготовлення і оброблення колоїдних систем (що дасть змогу створювати нові матеріали з унікальними властивостями). До впровадження методів вимірювання, основаних на взаємодії світла з частинками, більшість методів полягали або в

розділенні зразка (метод просіювання), або в аналізі обмеженої кількості частинок (мікроскопний метод). Упродовж останніх двох десятиліть, завдяки впровадженню та комерціалізації лазерної техніки та мікроелектроніки (включаючи комп'ютери), наука і технологія вимірювання розмірів частинок сильно розвинулася.

Сьогодні багато нових технологій успішно розвиваються і застосовуються для дослідження частинок, тоді як деякі раніше популярні методи поступово перестають застосовуватися. Тому для подальшого активного розвитку нанотехнологій потрібно визначити такі методи вимірювання, які будуть оптимальними для вимірювання розмірів частинок певного матеріалу. Такі методи повинні бути точними, швидкими та неруйнівними і застосовуватися у широкому діапазоні розмірів частинок. Ця стаття описує фізичні основи для цілої низки оптичних методів, які застосовуються для цього. Крім того, аналізуються застереження і переваги цих методів і зроблене посилання на їх використання при випробуванні різних багатофазних систем.

Аналітичні методи, що використовуються для вимірювання розмірів частинок, можна поділити на групові та залежно від того, чи сигнал отримується від частинок з різними властивостями, чи від частинок з однаковими властивостями протягом кожного вимірювання. Як групові, так і не групові методи мають певні переваги та недоліки, тому вони часто доповнюють один одного. Переваги групових методів, такі як швидкість і неруйнування, є одночасно недоліками не групових методів, які є доволі тривалими та руйнують зразок. У групових методах, оскільки сигнал отримується від частинок з різними властивостями, потрібно застосовувати оброблення інформації, який часто потребує моделювання і може бути достатньо складним. Двома найпоширенішими груповими методами для визначення розмірів частинок є динамічне розсіяння світла та лазерна дифракція. З іншого боку, на відміну від низької роздільної здатності групових методів, перевага не групових методів у високій роздільній

здатності. Для не групових методів матеріал перед вимірюванням повинен бути розділений відповідно до певної властивості, тому всі не групові методи повинні включати механізм розділення. Залежно від методу розділення вимірювання можуть визначати одну частинку за один момент часу або групу частинок, які мають однакове значення розміру. Двома типовими методами, які використовують вимірювання однієї частинки, є оптичне підраховування частинок і принцип Coulter (метод електрочутливої зони) Вибір відповідного аналітичного методу залежить від вимог до застосування і доступності відповідної техніки. Тому користувачі часто повинні йти на компроміс, вибираючи оптимальний метод для вимірювання розмірів потрібних частинок.

1.8.1 Метод динамічного розсіювання світла.

Одним з найпоширеніших методів, що використовуються для характеристики колоїдних розчинів, є динамічне розсіювання світла (ДРС), також відоме як фотонна кореляційна спектроскопія (ФКС) і квазіеластичне розсіювання світла (КЕРС). В останні роки цей метод розвинувся у потужний інструмент для дослідження розподілів розмірів субмікронних частинок у рідких розчинах. Він є одним з найвідоміших, неруйнівних, відтворюваних фізико-хімічних методів, що використовуються для характеристики і вивчення полімерів і колоїдів. Інструменти, що побудовані на цій технології, успішно використовуються як в науковій роботі, так і під час виготовлення чи оброблення для аналізу різноманітних продуктів, що базуються на суспензіях частинок з діапазоном діаметрів від 2 нм (20 ангстрем) до приблизно 2–3 мкм. Можливими застосуваннями цього методу є полімери латексу, колоїдний кремній, пігменти і барвники, олійні і водні емульсії, міцели і мікроемульсії, протеїни та інші макромолекули, що мають біологічне значення. Динамічне розсіювання світла пов'язане з часовою поведінкою інтенсивності світла, розсіяного від ансамблю частинок, розчинених в рідині.

Метод ДРС визначає флуктуації інтенсивності розсіяного світла, які зумовлені дифузією або броунівським рухом частинок незалежно від ефективності, з якою вони розсіюють світло.

Отже, цей метод відрізняється від класичного розсіювання світла, яке пов'язане тільки з середньою інтенсивністю розсіяного світла, з якої можна визначити середню молекулярну масу частинок. Відносно розташування частинок в розсіювальному об'ємі у кожен момент визначає рівень конструктивної або деструктивної інтерференції розсіяного світла на детекторі. Оскільки величина дифузії, або швидкість частинок визначається їхнім розміром (якщо в'язкість рідини і температура відомі і сталі), інформація про розмір міститься у величині флуктуацій інтенсивності розсіяного світла. Нижня межа вимірювання розмірів частинок визначається інтенсивністю розсіювання і інструментальним шумом. Щоб отримати правильні результати, флуктуації вимірюваного розсіювання повинні бути більшими, ніж шум від джерел, включаючи зовнішні впливи, флуктуації температури, і шум електроніки.

Верхня межа вимірювання розмірів частинок визначається переважно осадом. Частинки повинні бути стабільно розташовані в зразку, оскільки частинки, які осідають, мають направлений рух, що вносить ускладнювальну інформацію у флуктуації розсіювання. Практично верхня межа для експерименту ДРС становить декілька мкм залежно від густини матеріалу і в'язкості розчинника, а нижня межа становить декілька нм залежно від різниці показників заломлення між частинками і розчинником. Броунівський рух частинок спостерігають, використовуючи лазер і автокорелятор, для вимірювання коливань інтенсивності розсіяного світла, і далі визначають середнє значення коефіцієнта дифузії. Світло від когерентного джерела – зазвичай 5 мВт HeNe лазера – фокусується на кювету в якій розміщена розчинена суспензія частинок. Температура оптичної комірки підтримується сталою за допомогою термоелектричного елемента Пельтьє. Останнім часом як джерела світла використовуються діодні лазери, оскільки вони дешевші,

мініатюрніші і мають можливість з'єднання з оптичними волокнами. Як оптична комірка може використовуватися проста квадратна або кругла кювета, або складніша кювета з кращою температурною стабільністю і вищою оптичною якістю. Типовий об'єм зразка становить декілька мілілітрів або менше. Частинки у розсіювальному об'ємі, який розміщений на перетині світлового пучка і приймальної оптики, розсіюють світло в усіх напрямках. Залежність флуктуацій розсіяної інтенсивності від часу визначається розміром частинок. Малі частинки дифундують порівняно швидко, зумовлюючи швидкі флуктуації сигналу розсіяної інтенсивності. З іншого боку, більші частинки дифундують повільніше, зумовлюючи повільнішу зміну сигналу Ізаг з часом. Звичайно, легкість, з якою частинки цього діаметра можуть дифундувати у рідині, залежить не тільки від їхнього розміру, а також від в'язкості рідини. Радіус частинок можна визначити, знаючи величину дифузійності, за допомогою відношення Ейнштейна–Стокса.

Загалом, досліджувані суспензії містять більше ніж один розмір, вони займають порівняно великий діапазон діаметрів частинок. У такому разі метою методу ДРС є аналіз флуктуацій сигналу розсіяної інтенсивності та отримання наближеного розподілу дифузійностей частинок, з якого може бути отриманий розподіл розмірів частинок. Відношення Ейнштейна–Стокса, яке пов'язує дифузію з розміром частинки через фізичні константи та експериментальні параметри, використовується, для визначення розміру, якщо відомий коефіцієнт дифузії.

У разі монодисперсного розподілу розміру визначення дифузії є простим, оскільки з аналізу даних потрібно тільки зробити розклад по одній експоненціальній функції. Проте введення полідисперсії в зразок, а відтак і рівняння, що використовуються, щоб отримати інформацію від автокорелятора швидко, роблять аналіз одночасно складнішим і менш стійким. Зауважимо, що ДРС не вимірює розмір безпосередньо, а визначає коефіцієнт дифузії. Тоді робляться певні припущення, що дають змогу

обчислити розмір.

Якщо визначити це застереження, можливість неправильної інтерпретації зменшується. Дійсно, є випадки, де оцінка дифузійних коефіцієнтів тільки методом ДРС за певних умов розв'язку є достатньою для кількісного моделювання взаємодій між частинками таких субмікронних колоїдів, як міцели та емульсії. ДРС застосовується насамперед до тих систем, що складаються з субмікронних частинок, таких, як парентеральні емульсії і ліпосоми. Крім того, здатність виявити частинки діаметром 3 нм робить метод одним з небагатьох, що можуть використовуватися, щоб безпосередньо спостерігати міцели. Якщо мікро емульсії досліджуються цим методом, вимога, що зразок повинен бути оптично тонким, може зумовити розчинення зразка у 500 разів або більше. Такі розчинення можуть порушити будь-яку колоїдну систему, а мікроемульсії, які за визначення є системами в термодинамічній рівновазі, особливо чутливі. Щоб зменшити потребу у таких розчиненнях, були введені нові підходи, такі, як використання волоконнооптичних давачів, і такі системи є комерційно доступними.

1.8.2 Лазерна дифракція

Сьогодні для вимірювання розмірів частинок у багатьох застосуваннях широко використовуються методи лазерної дифракції. Успіх цього методу ґрунтується на тому, що він може застосовуватися для різних видів систем, що містять частинки, є швидким і може бути автоматизованим. Проте для отримання точних результатів потрібна правильна інтерпретація отриманих результатів, оскільки методом лазерної дифракції вимірюється не безпосередньо розмір частинки, а світло, розсіяне частинкою. Відношення між розсіяним світлом і обчисленим розподілом частинок залежить від припущень про оптичні властивості досліджуваного матеріалу. Метод лазерної дифракції ґрунтується на явищі розсіювання світла частинками в усіх напрямках: спостерігається дифракційна картина розподілу інтенсивності, яка залежить від розміру частинки. У цьому методі

інтерференційна картина проектується на поверхню двовимірного детектора, причому лазерне світло проходить через зразок, поміщений між детектором і джерелом світла. Масив детекторів підсумовує всі розподіли розсіяного світла від окремих частинок в ансамбль. Розподіл енергії, виміряний у радіально розташованих сенсорних елементах, аналізується і на його основі розраховується розподіл частинок за розмірами. Цей розрахунок може здійснюватися як за теорією Фраунгофера, так і за теорією Мі. Простота роботи з інструментом, висока типова продуктивність, і менш строгі вимоги для розчинення зумовили використання методу для характеристики емульсій, наночастинок, ліпосом і флокулярних систем. Проте суворе застосування теорії Фраунгофера вимагає, щоб частинки були оптично щільними і більшими, ніж 2 мкм у діаметрі.

1.8.3 Статичне розсіювання світла

Цей метод є удосконаленням методу лазерної дифракції, зумовленим тим, що упродовж останніх років:

1) Розсіювання світла не обмежується тільки ефектами дифракції. Використовуються загальніші підходи, основані на теорії розсіювання Мі для вимірювання інтенсивності розсіяння у ширшому діапазоні кутів. Діапазон розмірів розширений до субмікронної області.

2) Використання джерела світла з неперервними довжинами хвиль (білим світлом) на доповнення до основного лазерного джерела, щоб отримати більше інформації про субмікронні частинки, ґрунтуючись на залежності розсіяної інтенсивності від довжини хвилі та поляризації. Отже, діапазон вимірюваних цим методом розмірів становить 0,04 – 2000 мкм. Історично лазерна дифракція враховувала тільки малі кути, до 14° , що обмежувало застосування методу розміром близько 1 мкм. Причиною цього обмеження було те, що менші частинки розсіюють переважно на більші кути.

Однак цей метод розширювався, завдяки включенню більшого діапазону кутів і застосуванню теорії Мі, на додаток до теорій наближення, таких, як

теорія Фраунгофера та аномальної дифракції. Теорія Фраунгофера ґрунтується на дифракції на краях частинок. Вона підходить тільки для повністю поглинаючих частинок і малих кутів розсіяння. Для розмірів частинок у межах довжини хвилі і менше припущення Фраунгофера про сталий коефіцієнт екстинкції вже несправедливе. Для урахування оптичних властивостей частинок використовується теорія Мі. Ця теорія описує випромінювання для всіх просторових напрямків і навколо гомогенної сферичної частинки в гомогенному, неабсорбувальному середовищі. Частинки можуть бути прозорими чи повністю адсорбувальними. Теорія Мі стверджує, що розсіяння світла ґрунтується на явищі резонансу. Якщо промінь світла з певною довжиною хвилі потрапляє на частинку, то частинка – залежно від відношення довжини світлової хвилі до її діаметра і залежно від коефіцієнтів заломлення частинки і середовища – здійснює електромагнітні коливання на тій самій частоті, що і світло, яке її збуджує. Частинка віддає отриману енергію у вигляді розсіяного світла з певним розподілом у тілесному куті. Згідно з теорією Мі можливі декілька коливальних станів з різною ймовірністю, і існує зв'язок між оптично активним перерізом і розміром частинок, довжиною світлової хвилі і показниками заломлення частинок і середовища. Тому для використання теорії Мі повинні бути відомими показники заломлення та коефіцієнти поглинання частинок і середовища.

Більшість сучасних інструментів уможливорює вимірювання на більших кутах розсіювання, деякі аж до 150° , за допомогою, наприклад, застосування збіжного пучка, більшої кількості або ширших лінз, другого лазерного променя або більшої кількості детекторів. Так можна вимірювати менші частинки, розміром близько 0,1 мкм. Деякі інструменти включають додаткову інформацію про інтенсивність розсіяння і різницю інтенсивностей при різних довжинах хвиль і площинах поляризації для того, щоб покращити визначення розмірів частинок у субмікронному діапазоні.

Статичне розсіювання світла (СРС) здійснюється освітлюванням зразка

пучком світла і вимірюванням інтенсивності розсіяного випромінювання як функції кута і концентрації розсіювача. Тому у методі повністю і суворо виконано математичні і геометричні виміри, що диктуються теоріями Мі і Релея–Ганса–Дебая (РГД). Апаратура, що проектується спеціально для цієї мети загалом, включає лазер як джерело світла, доступні кути спостереження від 10° до 170° , і багатоканальне детектування.

Світло від джерела білого світла проходить через фільтри з декількома довжинами хвиль і двома поляризаціями. Розсіяне світло приймається детекторами, розташованими в діапазоні кутів $60\text{--}145^\circ$. Після закінчення вимірювання значення, отримані на детекторах, послідовно при різних довжинах хвиль і різних поляризаціях записуються в файл даних і в поєднанні з даними, отриманими методом розсіювання вперед, дають змогу вимірювати розміри частинок близько десятків нанометрів. Теорії, що використовуються, для отримання інформації про розмір з даних СРС, складні, але володіють роздільною здатністю, кращою, ніж в дифракції Фраунгофера, і ґрунтуються на інших застосуваннях розсіювання світла, ніж теорії ДРС. На жаль, СРС стикається з деякими з таких самих математичних труднощів, як ДРС, коли розглядаються зразки з полідисперсією розмірів, наприклад, з'являється нестабільність результатів, ймовірність яких зменшується, якщо наявна попередня інформація про зразок.

1.8.4 Оптичне визначення однієї частинки

Цей метод є одним з основних, що використовуються для моніторингу довкілля і контролю багатьох матеріалів, що складаються з частинок. Через здатність виконувати вимірювання "на місці" метод визначення однієї частинки широко використовується для аналізу забруднень (наприклад, води, чистих кімнат, гідравлічних рідин) і аналізу рідких та газоподібних частинок в атмосфері. У такому разі розподіл розмірів є менш важливим, ніж концентрація частинок з розмірами, які перевищують деякий визначений поріг. У багатьох застосуваннях, які вимагають точного контролю у певному

діапазоні розмірів частинок, оптичне визначення однієї частинки є незамінним для перевірки якості продукту.

Метод оптичного визначення однієї частинки є, можливо, єдиним методом реального часу, який може бути використаний для отримання інформації незалежно від того, чи всі частинки досліджуваного матеріалу потрапляють у певні визначені межі діапазону розмірів. Одночасне підрахування, вимірювання розмірів та ідентифікація матеріалу "на місці" з використанням окремих частинок в зразку є тими характеристиками, які активно розвиваються сьогодні.

Вимірювання окремих частинок через їхню взаємодію зі світлом застосовувалося багато років. Сучасний метод оптичного визначення однієї частинки використовує як розсіяння світла від окремих частинок для вимірювання малих частинок (деколи від 50 нм), так і поглинання світла, зумовлене наявністю частинок в пучку світла для вимірювання великих частинок (до 1 мм). Частинки можуть бути у формі аерозолів, сухих порошків або рідких суспензій. У цьому методі індивідуальні частинки, що проходять через давач, розподіляються за розмірами на основі змін в оптичному сигналі, які виникають при їхній наявності.

У результаті ми отримуємо сортування величини фотоструму, створюючи гістограму, що передає розподіл розмірів частинок у тій частині зразка, що проходить через давач. Відповідно, якщо досліджено достатню кількість частинок, можна отримати повне розуміння розподілу розмірів частинок, без необхідності застосування математичних моделей для одержання результатів експериментальних даних.

Недоліком є те, що точність розподілу розмірів у діапазонах з невеликою кількістю частинок мала через статистичну невпевненість, що відзначається при розрахунку низькоймовірнісних подій. Крім того, розміри потрібно відкалібрувати згідно із еталонами, переважно тими, що мають оптичні характеристики, подібні до оптичних характеристик зразка.

Першочерговою проблемою у разі використання методів визначення

однієї частинки є можливість одночасної наявності двох або більше частинок в детекторі, що призводить до неправильної інтерпретації розподілу розмірів. Такі збіги загалом виявляються наявністю нелінійності в концентраційній залежності і усуваються розчиненням зразка доти, доки це перестане бути статистичною проблемою. Проте, як і для розсіювання світла, це розчинення може зумовити відхилення складу зразка від його початкового стану.

1.8.5 Інші методи

Описані вище методи мають певні недоліки, тому подальші дослідження спрямовані на удосконалення цих методів. Добре відомою проблемою для методів, що ґрунтуються на вимірюваннях інтенсивності розсіювання, є неоднорідний профіль спадного гауссоподібного лазерного пучка. Щоб усунути цю невизначеність гауссоподібного пучка, було запропоновано декілька методів з використанням абераційних лінз, сегментованих масивів клинів, оберненогауссівських пропускних фільтрів і поляризаційно-селективних дифракційних фазових елементів.

Однак майже всі ці методи значно зменшують інтенсивність падіння, обмежуючи у такий спосіб визначальну здатність системи. Гауссівську невизначеність можна усунути за допомогою схеми інверсних матриць, однак цей метод залежить від траєкторії частинок. Є різні методи вимірювання швидкості частинки. Ці методи включають фотографування і розсіювання частинками, що перетинають проектовані ґратки.

Варіант останнього методу – лазерна доплерівська велосиметрія (ЛДВ), в якій ґратки формуються двома лазерними променями, що перетинаються. Фотографія може одержати швидкості в широкій області, але пов'язана з труднощами в аналізі розподілу розмірів частинок, особливо для малих частинок.

Ґраткові методи звичайно вимірюють тільки один компонент швидкості, ортогональної до ліній. Це можна подолати за допомогою двоколірної ЛДВ, де дві ґратки сформовані під прямим кутом одна до одної і сигнали

розділяються за допомогою дискримінації довжини хвилі. ЛДВ може вимірювати розміри частинки, але тільки в обмеженому діапазоні. Удосконаленням ЛДВ є фазова доплерівська анемометрія (ФДА). Цим методом можна вимірювати швидкість, а також розмір в широкому динамічному діапазоні. Як ЛДВ, так і ФДА у певних межах є нечутливими до гауссоподібного профілю променя. Головною перевагою цього методу є його простота і відсутність потреби юстування. Під час вивчення випробуваний простір складався з двох ортогонально поляризованих паралельних променів. Визначали інтенсивність, що падає на частинку, використовуючи певний алгоритм, розроблений для відтворення швидкості і напрямку. Було прийнято, що частинки малі порівняно з шириною гауссівських променів, отже, розсіяння з розміром частинки. Калібрування системи виконувалося за допомогою сертифікованих сферичних частинок. Останнім часом для визначення розмірів частинок у концентрованих суспензіях застосовуються нові методи, що ґрунтуються на багатократному розсіянні світла, такі, як спектроскопія дифузної хвилі та акустична спектроскопія. Ще одним потенційним методом для оперативного дослідження багатократного розсіяння концентрованих колоїдних суспензій є метод фотонної міграції.

Оскільки цей метод визначає характеристики поширення, що залежать від часу, а не величину інтенсивності, він є самокаліброваним і не потребує зовнішнього калібрування. Крім того, метод фотонної міграції уможливорює незалежне визначення поглинання і розсіяння. Як наслідок, на характеризування колоїдних розсіювачів не впливають зміни поглинання світла чи колір рідини суспензії. Оскільки цей метод залежить від багатократного розсіяння світла, він обмежений для нерозчинених частинок суспензій, через те, що суспензії є переважно непрозорі. Як розподіл розмірів так і об'ємні частки можна отримати за допомогою алгоритмів інверсії, де єдиним фізичним параметром, який необхідний, є відносний показник заломлення між частинкою і середовищем.

1.8.6 Вимірювання лінійних та кутових розмірів

Вимірювання лінійних та кутових розмірів займають значне місце в різних галузях науки та техніки, зокрема, в машино – та приладобудуванні, де вимірювання цих величин займають до 80% від всіх вимірювань в цих галузях.

Завдання вимірювань лінійних та кутових розмірів можна розділити на такі групи:

- вимірювання лінійних розмірів в діапазоні від часток мкм до декількох десятків метрів та кутових розмірів, обмежених найчастіше повним колом з діапазоном вимірюваних значень кутових розмірів від $0,1^\circ$ до 360° . Найпоширенішими в цій групі є вимірювання розмірів деталей, відхилення розміру деталі від заданого значення, вимірювання параметрів поверхні, товщини покриттів;
- вимірювання розмірів від часток метра до сотень метрів при визначенні рівня рідких та сипучих речовин у різних резервуарах та свердловинах, рівня пального в баках різних транспортних засобів;
- визначення координат об'єктів та відстаней між об'єктами, зокрема і космічними, що знаходяться в межах від одиниць міліметра до мільйонів кілометрів.

Останнім часом під впливом інтенсивного розвитку інтегральних схем, мікропроцесорних пристроїв відбулось корінне оновлення та значне урізноманітнення техніки, що застосовується при вимірюваннях лінійних та кутових розмірів. Сьогодні, завдяки прогресу в конструюванні приладів, можуть бути реалізовані такі методи вимірювань, які ще декілька років тому здавалися неймовірними. Нові апаратні рішення ведуть до появи нових різновидів методів вимірювань. Донедавна для вимірювань геометричних розмірів застосовували здебільшого прилади, що працюють за аналоговим принципом. Сьогодні в зв'язку зі значним прогресом в галузі первинних вимірювальних перетворювачів та винятковими можливостями цифрової

вимірювальної техніки на перший план виходять цифрові засоби вимірювань цих величин. Їх основні переваги: можливість автоматизації вимірювального процесу та автоматичної обробки результатів вимірювань, неперервний запис результатів вимірювань тощо. Тому зупинимось тільки на електричних засобах, зокрема з цифровим виходом, не забуваючи про те, що основною ланкою засобів вимірювань геометричних розмірів є первинний вимірювальний перетворювач.

Основні електричні методи та відповідні засоби вимірювань лінійних та кутових розмірів залежно від наявності чи відсутності механічного контакту між досліджуваним об'єктом та засобом вимірювань поділяють на контактні та безконтактні, а залежно від принципу вимірювального перетворення методи поділяють на електромеханічні, електрофізичні та спектрометричні (хвильові).

Електромеханічні методи залежно від виду первинного перетворювача поділяють на резистивні, індуктивні, ємнісні, оптоелектронні, обкочування тощо.

Електрофізичні методи вимірювань основані на використанні відмінності в фізичних властивостях речовин, що знаходяться на різних сторонах границь вимірюваного розміру. Для вимірювань лінійних та кутових розмірів використовують методи та прилади, основані на відмінностях електричних, магнітних, теплових та інших властивостей. Відповідно електрофізичні методи поділяються на електромагнітні, ємнісні, кондуктометричні тощо. Найпоширенішими з електромагнітних є вихроструміві та резонансні методи.

Спектрометричні методи та відповідні засоби вимірювань залежно від довжини хвилі випромінювання, що використовується при вимірюванні, поділяють на звукові, ультразвукові, радіохвильові, надвисокочастотні, оптичні (лазерні). Залежно від фізичних явищ, які використовуються при вимірюванні, спектрометричні методи класифікують на локаційні, інтерферометричні, рефрактометричні тощо.

Електромеханічні методи широко застосовуються для вимірювань розмірів деталей та шорсткуватості поверхні (контактні штангенциркулі, мікрометри, профілометри), для вимірювань рівня (поплавкові та буйкові рівнеміри). Для вимірювань відстаней, пройдених транспортними засобами, широко використовують спосіб обкочування.

В контактних мікрометрах та профілометрах координати досліджуваного об'єкта попередньо перетворюються в лінійне переміщення голкоподібного щупа, а згодом в електричний сигнал за допомогою індуктивних, взаємоіндуктивних чи ємнісних перетворювачів.

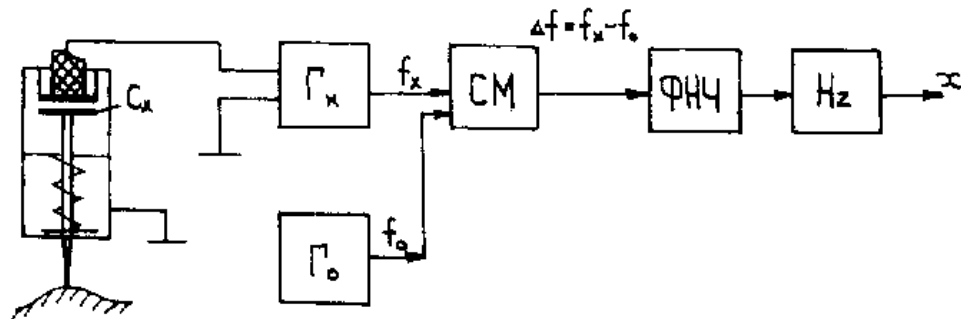


Рис. 1.18 – Принцип дії ємнісного профілометра

Рис. 1.18 пояснює принцип дії вимірювача малих розмірів на основі ємнісного перетворювача, який є елементом І-С-контура кварцового генератора. Ємнісний перетворювач має нерухомий електрод 1, напилений на полірований скляний стержень 2, та рухомий електрод 3, механічно з'єднаний з голкоподібним щупом 4, закріпленим в корпусі за допомогою плоских пружин 5. Ємнісний перетворювач за допомогою кабелю з'єднаний з кварцовим генератором, вихідна частота f_x якого є функцією ємності C_x між рухомим та нерухомим електродами. Частота f_x та частота f_0 від опорного генератора частоти подаються на вхід змішувача, вихідна частота якого $\Delta f = f_x - f_0$. Виміряна частотоміром частота Δf відповідатиме значенню вимірюваного розміру.

Враховуючи, що:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}, \quad (1.5)$$

$$\text{а при } C_x = C_{x0} + \Delta C = C_0 + \Delta C \quad (1.6)$$

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_x}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0 \left(1 + \frac{\Delta C}{C_0}\right)}}, \quad (1.7)$$

Матимемо:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0 \left(1 + \frac{\Delta C}{C_0}\right)}} - \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \right) \approx -\frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C_0} f_0. \quad (1.8)$$

За наведеною схемою будуються мікрометри з порогом чутливості в частки мкм та діапазоном вимірювань 0,1...1 мм. Такий мікрометр може використовуватись для вимірювань параметрів шорсткості. Однак у цьому випадку можуть виникати значні похибки через деяку нелінійність в перетворенні реального профілю шорсткуватої поверхні в лінійне переміщення щупа. Виникають також похибки через відривання щупа в деяких точках профілю поверхні та внаслідок деформації (пружної та пластичної) досліджуваної поверхні під дією сили з боку щупа. Ці похибки визначаються зусиллям, що створюється щупом.

Це зусилля загалом не є сталим і може змінюватись залежно від інерційності перетворювача, радіуса щупа, властивостей матеріалу та характеру профілю досліджуваної поверхні. В цьому відношенні перевагу має віброконтактний метод, оснований на перетворенні в електричний сигнал коливань вібруючого щупа.

Віброконтактний метод дає змогу здійснювати вимірювання при незначних зусиллях щупа, який тільки періодично торкається досліджуваного об'єкта. Завдяки цьому можна використати тонкі щупи, що

дає можливість вимірювати розміри деталей, що легко деформуються, а також об'єктів складної конфігурації.

Подібними за своєю конструкцією та вимірювальним колом є індуктивні мікрометри-профілометри, в яких вимірювальний щуп у своїй верхній частині має закріплений феритовий стержень, котрий при переміщенні штока змінює індуктивність вимірювальної котушки. Котушка, індуктивність L_x якої є функцією вимірюваного переміщення x , становить частотнозалежний елемент LC -генератора.

Якщо частина опорного генератора

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}, \quad (1.9)$$

А частота вимірювального генератора

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x C_0}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0 \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right)}}, \quad (1.10)$$

Тоді:

$$\Delta f \approx -\frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L_0} f_0. \quad (1.11)$$

Мікрометри-профілометри з індуктивним первинним перетворювачем дають змогу вимірювати мікронерівності від 0,1 мкм, а верхня границя вимірювань становить звичайно декілька мм.

Здебільшого, в приладо- та машинобудуванні необхідно вимірювати не все значення розміру, яке може досягати десятків см і більше, а лише його відхилення від деякого заданого значення, оскільки в процесі виготовлення деталі контролюється її розмір. Ці відхилення звичайно не перевищують часток мм, а отже, названі мікрометри можуть бути застосовані для цих потреб.

1.8.7 Методи і засоби лінійних вимірювань

Лінійні вимірювання здійснюються приладами, забезпеченими лінійними еталонними мірами і вимірювальними мікроскопами і діють за принципом порівняння еталону і контрольованого об'єкта. Однак різниця самих еталонних мір дозволяють розділити такі прилади на дві великі групи.

Прилади першої групи призначені для визначення малих відхилень вимірюваного об'єкта від розміру кінцевої міри еталонного об'єкта (відносні вимірювання, диференціальний метод). До приладів цієї групи відносяться оптиметри, ультраоптиметри і оптикатори.

Прилади другої групи призначені для безпосередніх вимірів об'єктів шляхом порівняння їх з еталонними штриховими мірами (шкалами). Еталонна шкала може бути вбудована у вимірювальний прилад (абсолютні вимірювання, метод безпосередньої оцінки). До приладів цієї групи відносяться компаратори, довгоміри, сферометри, катетометри, вимірювальні машини.

1.8.8 Прилади для відносних вимірювань

Оптиметри. Принцип дії заснований на поєднанні оптичного і механічного важелів. Оптична частина складається з автоколіматора (зазвичай Аббе) і хитного дзеркала, механічна - являє собою важіль, пов'язані з вимірювальним стрижнем і хитним дзеркалом. Дзеркало нахиляється в невеликих межах під дією вимірювального стрижня, кінець якого знаходиться в контакті з вимірюваним зразком. Поворот дзеркала викликає зсув автоколімаційного зображення шкали, яке спостерігається в окуляр і відраховується по нерухомому вказівнику.

Ультраоптиметри – оптиметри підвищеної точності. Підвищення точності обумовлено застосуванням дзеркального оптичного помножувача, що складається з рухомого і нерухомого дзеркал. Рухоме дзеркало пов'язане важелем з вимірювальним стрижнем і відхиляється при його переміщенні. Промінь після багаторазового відбиття в оптичному помножувачі

повертається в автоколіматор або направляється до зорової труби. Величина відхилення променю пропорційна кількості відбиттів.

Оптикатори – на відміну від оптиметрів, в яких застосовуються шарніри з опорами ковзання і кочення, в них використовується пружинний шарнір). Поворот пружини, до якої прикріплено плоске дзеркало, щодо своєї поздовжньої осі пропорційний зміщенню вимірювального стрижня. У свою чергу, поворот дзеркала викликає переміщення відбитого від нього променю (зображення щілини) за шкалою.

1.8.9 Прилади для абсолютних вимірювань

Компаратори - призначені для вимірювання штрихових і кінцевих мір шляхом безпосереднього порівняння їх з штриховими еталонними шкалами

Компаратори мають рухомий стіл, на якому встановлюють еталонну шкалу, вимірюваний об'єкт, два мікроскопи, один з яких є візирним, а інший – відліковим і забезпечений окулярним мікрометром.

Візирні і відлікові мікроскопи послідовно наводяться на початок і кінець відповідно еталонної і вимірюваних шкал.

При компарируванні можна зміщати мікроскопи нерухомих шкал або шкали щодо нерухомих мікроскопів.

Найменші похибки має поздовжній компаратор Аббе з розташуванням лінії вимірюваної і еталонної шкал на одній прямій.

Шкали переміщуються на каретці вздовж лінії візування, а мікроскопи встановлені на стійці.

Катетометри - призначені для дистанційного вимірювання відрізків (вертикальних) які неможливо безпосередньо виміряти. Принцип роботи приладу полягає в тому, що зорова труба послідовно наводиться на крайні точки вимірюваного об'єкта. Положення труби фіксується за допомогою відлікового мікроскопа з еталонною шкалою, закріпленої на стійці. Зорова труба і відліковий мікроскоп змонтовані в одній каретці і переміщуються одночасно.

Висновки до розділу 1

Аналіз показує, що дослідники мають у своєму розпорядженні багато оптичних методів для вимірювання геометричних розмірів шкал та сіток за допомогою різноманітної техніки, зокрема на приладах із зарядовим зв'язком.

Проте, ці методи можуть охопити діапазон розмірів від 10 нм до 10 мкм, потрібно визначити групу методів і підходів, які при сумісному використанні можуть повніше характеризувати розподіл розмірів частинок в цьому діапазоні краще, ніж міг би будь-який єдиний метод. Використання різноманітних додаткових технічних підходів дає змогу досягти надійніших результатів, проте отримання точної і повної інформації про зразок можливе, тільки якщо використовуються різні методи, які ґрунтуються на фундаментально різних принципах.

Було проведено огляд сучасних засобів визначення геометричних розмірів шкал та сіток, та проведено огляд відомих методів визначення шкал та сіток. Огляд методів та засобів показав доцільність створення лабораторного стенду та методики вимірювання геометричних параметрів. Оптико-електронна реєстрація застосовується у всіх областях спектру, характеризується високою чутливістю, точністю, дуже малою постійною часу, легко автоматизується і комп'ютеризується. Однак вимагає складних електронних систем і викликає труднощі при початковій установці і юстуванні. Перспективним і широко застосованим у даний час методом є об'єднання в одному приладі візуальної і оптико-електронної реєстрації. При цьому в стадії налаштування використовується візуальний канал, а для робочих вимірювань – оптико-електронний.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ

2.1 Принципи побудови оптимальної структури оптико-електронного приладу для визначення геометричних розмірів об'єктів

Створення нової техніки, наукоємких технологій і нових матеріалів, які забезпечують розвиток структури і технічного рівня виробництва, багато в чому, визначається рівнем метрологічного забезпечення вимірювань. Однією з найважливіших задач розвитку наукоємких технологій є розробка нових методів та високоточних засобів лінійних вимірювань з точністю до одного нанометра.

За останні роки у вимірювальній техніці, завдяки досягненням мікроелектроніки, створилися значні якісні зміни. До засобів вимірювання стали включати мікропроцесори, які забезпечують автоматичне управління процесом вимірювання та обробкою даних, тобто додають цим засобам «інтелектуальних» якостей. Багато яких механічних принципів вимірювань тепер вдається реалізувати суто електронними засобами. В зв'язку з розробкою різних датчиків в інтегральному мікроелектронному виконанні у вимірювальній техніці з'явилися нові пристосування та перспективи розвитку. Знайшла широке застосування і цифрова вимірювальна техніка. Це призвело до того, що зараз засоби вимірювальної техніки головним чином використовуються у складі автоматизованих систем та комплексів. Важливі напрямки державної політики по розробці принципово нових технічних рішень при створенні мікроелектронних приладів та мікро системної техніки різного призначення визначають основні задачі по метрологічному забезпеченні лінійних вимірювань, розробці нових методів та високо прецизійних засобів вимірювань геометричних розмірів об'єктів в діапазоні від 1 нм до 1000 нм.

Скануючий зондовий мікроскоп (СЗМ) дозволяє вимірювати довжини в діапазоні від 1 нм до 1000 нм з роздільною здатністю менше 0,1 нанометрів. Такі відстані є незвичайно малими навіть для сучасної техніки і їх досягнення пов'язано з певними труднощами при розробці та експлуатації цих мікроскопів. Причина яких полягає в великій кількості параметрів, які змінюються в широких межах. Для підтримки формального режиму процесу вимірювання необхідно вимірювати його параметри. Поряд з цим, чим достовірніше виконуються вимірювання цих параметрів, тим вище точність вимірювання.

Оптимальна структура оптико-електронного приладу (ОЕП), якою являється СЗМ, що реалізує механізм самоналагодження, являє собою сукупність технічних засобів і програмного забезпечення. Така система працює у взаємозв'язку з оператором-метрологом, який застосовує новітні комп'ютерні компоненти та реалізує роботу в реальному часі. За цих умов система здатна на основі апріорної інформації та вимірювань параметрів стану при наявності мотивації синтезувати мету, виробляти рішення про характер дії системи і знаходити раціональні способи досягнення мети. Розроблена концепція інтелектуальних систем використовується при оптимізації структури комплексу та обробки інформації нового покоління.

В рамках цієї концепції складний ОЕП, розробляється як функціональна, що сприяє досягненню заданої координати вимірювання та виступає в тому числі, і як системостворюючий фактор.

Вимогами до алгоритмів обробки інформації є відклик на будь-які непередбачені зовнішні та внутрішні дестабілізуючі фактори на протязі прогнозованого стану системи. Для одержання повної інформації про стан СЗМ, необхідно розглядати не тільки вимірювані параметри, але і змінні параметри стану.

Основна ціль дослідження полягає у розробці методики для побудови оптимальної структури ОЕП на основі СЗМ, до складу якої

входять датчики та вимірювальні системи, а також алгоритмічне забезпечення та блок тестування.

При управлінні основним джерелом інформаційно-вимірювальних сигналів є СЗМ. Основними вимогами до цього комплексу є точність вимірювання об'єкту.

Виходячи з вищенаведеного, можна визначити алгоритм функціонування вимірювального комплексу в наступній послідовності:

- з датчиків інформація поступає в блок основна база знань;
- блок тестування – проводить перевірку роботи всіх підсистем та здійснює тестування на точність ;
- на основі оцінки стану системи приймається рішення про готовність ОЕП до вимірювання та визначається алгоритм управління;
- здійснюється закон управління, при цьому інформація передається на виконуючі органи;
- інформаційно-вимірювальні дані про об'єкт вимірювання поступають та накопичуються в основній базі знань.

Основою для побудови оптимальної структури є визначення основних рівнянь керування. В загальному випадку рівняння для руху зонда СЗМ при вимірюванні має вигляд:

$$y(n) = K_U(q)U(n) + K_\xi(q)\xi(n), \quad (2.1)$$

де $U(n)$ - зовнішні впливи, $\xi(n)$ - випадкова завада,

$$K_U(q) = \frac{P_U(q)}{Q(q)} \quad (2.2)$$

$$K_\xi(q) = \frac{P_\xi(q)}{Q(q)} \quad (2.2)$$

- передаточні функції динамічного об'єкту по керуванню та впливу, відповідно.

Нев'язку можна представити рівнянням

$$\varepsilon(n) = y(n) - y(m), \quad (2.4)$$

де $y(n)$ – вихідні величини об'єкту, $y(m)$ – величина налагоджуваної моделі.

В ОЕП задача ідентифікації зводиться до алгоритму, де проводиться розпізнавання образів які вже надані в базі знань (визначені класи n). Але існує ще клас невідомих m об'єктів.

Таким чином задача ідентифікації складається з суми $n + m$, де $n \geq 1$ – кількість відомих, а $m \in \{0, \infty\}$ – кількість невідомих класів. Задача ідентифікації зводиться до перебору та зрівняння n класів з еталонними моделями після чого приймається рішення системою.

Така система найбільш прийнятна для вимірювання об'єктів за допомогою оптико-електронного приладу. В ній застосовуються вже відомі методи та алгоритми в теорії ідентифікації та зводяться до задачі розпізнавання об'єктів. Реалізація цієї схеми в системі керування СЗМ значно підвищує ефективність системи ідентифікації.

Слід відмітити, що застосування такого алгоритму призводить до більш досконалого процесу керування рухом зонду та визначення об'єктів вимірювання.

Для того щоб оптимальна структура ОЕП працювала злагоджено треба приділити увагу якості ідентифікації, яку можна оцінити її критерієм :

$$J(c) = M\{F[\varepsilon(z(n), c)]\}, \quad (2.5)$$

де $F[\cdot]$ – функція втрат, M – символ математичного очікування, ε – нев'язка, $z(n)$ – вектор спостереження, c – вектор налагоджуваних параметрів.

2.2 Аналіз проблем вимірювання геометричних параметрів за допомогою ОЕП

Створення нової техніки, наукоємких технологій і нових матеріалів, які забезпечують розвиток структури і технічного рівня виробництва, багато в чому, визначається рівнем метрологічного забезпечення вимірювань. Однією з найважливіших задач розвитку наукоємких технологій є розробка нових методів та високоточних засобів лінійних вимірювань з точністю до одного нанометра.

За останні роки у вимірювальній техніці, завдяки досягненням мікроелектроніки, створилися значні якісні зміни. До засобів вимірювання стали включати мікропроцесори, які забезпечують автоматичне управління процесом вимірювання та обробкою даних, тобто додають цим засобам «інтелектуальних» якостей. Багато яких механічних принципів вимірювань тепер вдається реалізувати суто електронними засобами. В зв'язку з розробкою різних датчиків в інтегральному мікроелектронному виконанні у вимірювальній техніці з'явилися нові пристосування та перспективи розвитку. Знайшла широке застосування і цифрова вимірювальна техніка. Це призвело до того, що зараз засоби вимірювальної техніки головним чином використовуються у складі автоматизованих систем та комплексів.

Незважаючи на значні досягнення, потенційні можливості ОЕП в багатьох задачах повністю не реалізуються, головним чином, внаслідок недосконалості методології їх використання. Можна назвати кілька причин такого положення.

По-перше, на сьогодні повністю вичерпали свої можливості існуючі методи поліпшення характеристик телевізійних вимірювальних приладів, зокрема, методи корекції нерівномірності чутливості ПЗЗ-матриць, що разом з відсутністю достовірних експериментальних результатів негативно позначається на точності вимірювання в мікро- та нанодіапазоні.

По-друге, існують значні розходження в методиках оцінки

характеристик ОЕП взагалі та в методиках оцінки їх потенційних можливостей при вирішенні задач вимірювання геометричних, динамічних та амплітудних параметрів.

Якщо ж врахувати ще й динаміку розвитку операційних систем та програмних засобів, вартість яких складає основну частку вартості телевізійних вимірювальних приладів, то стає очевидною потреба нової концепції побудови телевізійного мікроскопа, що враховує як потреби сучасного матеріалознавства, так і можливість оперативного реагування на появу нових технологічних вимог та більш досконалих апаратно-програмних засобів інформаційно-вимірювальної техніки.

телевізійних вимірювальних засобів можливе тільки на шляху вдосконалення методології застосування, створення спеціалізованих методик, алгоритмів для підвищення точності визначення тих характеристик телевізійних систем, які є важливими з точки зору їх використання як засобів вимірювання.

Першим кроком на шляху вдосконалення методології застосування ОЕП має бути визначення умов, за дотримання яких потенційні переваги телевізійної системотехніки (обсяг і час формування виборки відповідно 10^{-7} і 10^{-3} с, малі розміри елемента розкладу зображення 5 -10 мкм) можуть бути реалізовані в рамках конкретної задачі.

Свого часу в роботі було звернено увагу на необхідність виваженого підходу до питань застосування ОЕП, що дозволило визначити першочергові напрями підвищення ефективності їх застосування, тобто, сформулювати умови, за дотримання яких потенційні переваги телевізійної системотехніки більш повно трансформуються в таку важливу характеристику як точність вимірювання геометричних параметрів.

По-перше, сьогодні практично повністю вичерпали свої можливості існуючі методи корекції нерівномірності чутливості світлоелектричний перетворювач (СЕП), що негативно позначається на точності вимірювання геометричних та енергетичних параметрів. (Поняттям "нерівномірність

чутливості" визначається неідентичність властивостей елементів розкладу, що утворюють СЕП). Серед чинників, що впливають на точність визначення геометричних параметрів, нерівномірність чутливості (іноді вживають термін "геометричний шум СЕП") заслуговує особливої уваги, оскільки при однаковій освітленості СЕП сигнали будь-яких пікселів мають бути однаковими, тобто $C_{ij} \neq C_{pk}$ при $E_{ij} \neq E_{pk}$.

Такий метод корекції нерівномірності чутливості дозволяє суттєво знизити нерівномірність.

В принципі, формування компенсуючої матриці можна виконати для сукупності значень освітленості в робочому діапазоні, але розробка такої методики виходить за межі задач дослідження.

Чинники, які впливають на точність вимірювання геометричних параметрів об'єкту, обумовлені характеристиками технічних засобів, а також особливостями формування зображення об'єкту.

Зрозуміло, що кожний компонент ОЕП впливає певним чином на точність визначення геометричних параметрів зображення. Обмежимося розглядом тих компонентів, які входять в склад структурної схеми засобів і можуть бути головними джерелами похибок визначення геометричних параметрів.

Аналіз літературних джерел дає всі підстави зробити висновок про те, що найбільший внесок в сумарну похибку вимірювання координати вносять похибки, обумовлені шумами СЕП (власним та геометричним), методичні похибки визначення координат та похибки аналого-цифрового перетворення (АЦП), що дозволяє віднести їх до головних чинників, які впливають на точність визначення геометричних параметрів зображення.

Отже, сумарна похибка вимірювання координати може бути визначена за формулою:

$$\Delta P = \sqrt{\Delta_{\text{ш}}^2 + \Delta_{\text{г}}^2 + \Delta_{\text{ацп}}^2 + \Delta_{\text{м}}^2}, \quad (2.6)$$

де $\Delta_{\text{ш}}^2$ -складова похибки, обумовлена шумом СЕП, $\Delta_{\text{г}}^2$ - складова похибки, обумовлена геометричним шумом СЕП, $\Delta_{\text{ацп}}^2$ - складова похибки,

обумовлена шумом АЦП, Δm^2 - складова похибки, обумовлена методикою визначення параметру об'єкту.

Похибка АЦП складаються з інструментальної (нестабільність частоти та нелінійність характеристики), похибок дискретизації та квантування. Питання, пов'язані з похибками АЦП та їх впливом на сьогодні є достатньо вивченими, тому можна скористатися відомими результатами, наприклад

На етапі існування телевізійного зображення у вигляді цифрових масивів можливі методичні похибки, які обумовлюються алгоритмом визначення заданої характеристики, що потребує детального аналізу конкретних алгоритмів.

Якщо обумовлена нерівномірністю чутливості похибка буде повністю скомпенсованою (а скомпенсувати геометричний шум можливо при застосуванні досконалих експериментальних пристроїв для формування еталонної освітленості), а координати меж об'єкту є випадковими величинами із нормальним законом розподілу, то сумарна похибка вимірювання координати об'єкту визначається за формулою:

$$\Delta P = \sqrt{\sigma^2 + \Delta_{\text{ацп}}^2 + \Delta m^2} \quad (2.7)$$

Відповідно, сумарна похибка вимірювання лінійного розміру може бути ви-значена за формулою:

$$\Delta h = \sqrt{2} \Delta p \quad (2.8)$$

Висновки до розділу 2

Загальна методика застосування оптико-електронного приладу полягає в формуванні зображення, перетворенні його в цифровий код та використанні алгоритмів, які забезпечують необхідну точність вимірювання відповідних параметрів. Водночас, такі засоби надають унікальну можливість провадити вимірювання геометричних, динамічних та енергетичних параметрів об'єктів в реальному масштабі часу з високим просторовим розрізненням завдяки аналізу і власного випромінення, і того, що відбилося або пройшло через

об'єкт.

При використанні телевізійних засобів для вимірювання геометричних параметрів можливі значні розходження в методиках оцінки їх потенційних можливостей за умови вирішення конкретних задач. У більшості випадків приймають, що лінійне розрізнення обернено пропорційне лінійному розміру пікселя, а розміри пікселя визначаються типом СЕП і можуть бути в діапазоні від одиниць до десятків мікрометрів. Власне, саме ця обставина разом з малою тривалістю формування сигналу всієї матриці є принциповою особливістю телевізійних вимірювальних засобів, яка вже зараз відкриває перед ними широкі перспективи впровадження в наукові дослідження та в технологічну практику.

У той же час існує клас задач, наприклад, вимірювання розмірів контрастних мікрооб'єктів або вимірювання мікрозміщення об'єкту від заданого положення, коли вимірювання необхідно провадити з більшою точністю.

РОЗДІЛ 3 БУДОВА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ НА ПРИЛАДАХ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ

3.1 Вибір мікроскопу

Мікроскоп «Біолам Л-211»



Рис. 3.1 – Мікроскоп «Біолам Л-211»

Призначається для дослідження кристалічних та інших прозорих об'єктів в минаючому (звичайному і поляризованому) світлі в ортоскопічному і коноскопичному ході променів. Мікроскоп застосовується для масових робіт в мінералогії, петрографії, кристалографії, а також в біології, хімії, медицині та інших галузях науки і техніки.

Мікроскоп біолам Л-211 входить в серію агрегатних поляризаційних мікроскопів проходить і відбитого світла, які розрізняються комплектацією агрегатних вузлів та приладдя. На відміну від раніше випущених моделей робочих поляризаційних мікроскопів, нова модель має наступні переваги:

- Накладні освітлювачі замінені на освітлювальну систему, вбудовану в підставу, що дозволить підвищити надійність і скоротити час налаштування освітлення.

- Щипцеві пристрій зміни об'єтивів замінено на пятигньоздну Револьверне пристрій з центрована гніздами, що підвищить зручність роботи і скоротить час на настройку приладу.
- Введено новий конденсор, який забезпечує більш зручне і швидке перемикавання діафрагм і надійну їх центрування при роботі за методами «фокального екранування».
- Мікроскоп оснащений комплектом об'єтивів - планахроматов і компенсаційних окулярів, що дозволило поліпшити якість зображення в приладі.
- Змінено масштаб коноскопичної картини в приладі, що забезпечило більш високу чіткість зображення коноскопичних фігур

Мікроскоп «Мікромед с-11»



Рис. 3.2 – Мікроскоп «Мікромед с-11»

Мікроскоп Мікромед С-11 знаходить своє вживання в самих різноспрямованих областях, де потрібні якісні дослідження мікропрепаратів: це і машинобудування, і мінералогія, і археологічні дослідження, і досліди по ботаніці, і медичні аналізи, і багато інших. Цей сучасний мікроскоп дозволяє вивчати як зрізи, так і мазання біологічних об'єктів, причому і в забарвленому, і в незабарвленому вигляді. Це дає можливість широко застосовувати даний прилад, у тому числі, і в установах освіти.

Основні особливості:

- Повне просвітлене покриття оптичної системи.
- Ахроматичні об'єктиви 4X, 10X, 40X.
- Поворотна монокулярна насадка.
- Металевий наочний столик із затисками для фіксації препарату.
- Вбудований світлодіодний освітлювач з мінімальним енергоспоживанням.
- Наявність обмежувального гвинта, що оберігає препарат і об'єктив мікроскопа від пошкоджень при фокусуванні.

Мікроскоп «Ulab XSP-128B»



Рис. 3.3 – Мікроскоп Ulab XSP-128B

Мікроскоп «Ulab Xsp-128b» - якісний лабораторний оптичний мікроскоп. Дана модель оснащена бінокулярною насадкою, що дозволяє проводити візуальні спостереження в окуляр мікроскопа двома очима одночасно. Для забезпечення комфортніших умов спостереження бінокулярна насадка мікроскопа має можливість обертання довкола своєї осі на 360 град., кут нахилу окулярних трубок складає 30град. Відмінний вибір для проведення тривалих спостережень в мікроскоп. Біологічний мікроскоп Ulab Xsp-128B може застосовуватися в області клінічних, медичних

досліджень, для вчення і біологічних, фармацевтичних, бактеріологічних досліджень в медичних закладах, промислових лабораторіях, лабораторіях інститутів, коледжів, і так далі.

Особливості:

- Оптична система з кінцевою довжиною тубуса 160 мм;
- Револьверна голівка на 4 об'єктиви;
- Ахроматичні об'єктиви з компенсаційною довжиною 45 мм: 4х, 10х, 40х, 100х імерсійний;
- Ширококутний окуляр Wf10х;
- Коаксіальні гвинти грубого і точного фокусування;
- Міцний металевий кислотостійкий штатив мікроскопа;
- Фокусуючий стопор, що запобігає пошкодженню об'єктиву і препарату;
- Вбудований освітлювач 6 В 20 Вт, з регулюванням інтенсивності освітлення.

Таблиця 3.1-Порівняння характеристик мікроскопів

Параметри	Мікроскопи		
	UlabXSP-128B	Мікромед с-11	Біолаб Л-211
Збільшення, крат	1000	800	720
Збільшення об'єктивів, крат	4;10;40; 100;	4;10;40;	2,5;10; 25;40; 60;
Збільшення окулярів, раз	15х	20х;	10х;
Габаритні розміри, мм	220х160х360	115х155х280	510х460х200
Маса апарату, не більше, кг	5	1.7	8.6

3.2 Вибір телевізійної камери

ПЗЗ-камера NOVUS NVC-HC530-2



Рис. 3.4 – ПЗЗ-камера NOVUS NVC-HC530-2

1/3" Кольорова камера з високою чутливістю і високою роздільною здатністю.

Основні характеристики:

- Матриця SONY SuperHAD CCD PAL 752H x 582V;
- Роздільна здатність 540 ТВЛ, 0,4 лк;
- Фокусні відстані F1.2, С / Ш: 48 дБ;
- автоматичний електронний затвор,
- АРУ;
- компенсація засвічення фону;
- автоматичний баланс білого;
- функція захисту від мерехтінь;
- синхронізація: внутрішня / зовнішня;
- 12/24 В постійного струму.

IP відеокамера Novus NVIP-2DN3000H/IR-1P



Рис. 3.5 – IP відеокамера Novus NVIP-2DN3000H/IR-1P

Novus NVIP-2DN3000H / IR-1P - кольорова циліндрична IP-камера для роботи на вулиці, яка відмінно підходить для системи відеоспостереження для виробництва. Камера адаптована до складних зимових умов і здатна справно працювати до позначки в -40°C . Відеокамера поміщена в компактний корпус зі ступенем волого- і пилозахисту IP66, що надійно оберігає електроніку від погодних і механічних впливів. IP-камера має підтримку режиму «день / ніч», цифрову систему шумозаглушення (DNR), баланс білого (WB), компенсацію зустрічного засвічування (BLC), 4 приватних зони і детектор руху.

Камера Novus NVIP-2DN3000H / IR-1P обладнана двома інтерфейсами - стандартним мережевим роз'ємом RJ-45 і роз'ємом для підключення 12-вольта джерела живлення. Порт RJ-45 підтримує функцію живлення по мережі Ethernet (PoE), що знімає необхідність у використанні звичайного БП

Камера Acti Kcm-5211e



Рис 3.6 – Acti Kcm-5211e

Наднадійна IP камера відеоспостереження Acti Kcm-5211e призначена для використання поза опалювальними приміщеннями. Саме тому дана модель поставляється в компактному фіксованому корпусі, який відповідає стандарту IP66, що означає, що прилад лицьовий для роботи на вулиці і захищений від проникнення вологи і пилу. Ця керована камера отримала

гик-підсвічування, що дозволяє їй функціонувати при будь-якому рівні освітленості.

Модель була оснащена вбудованим об'єктивом з 18х масштабуванням і високоякісним світлочутливим сенсором, виконаним за технологією CMOS. Камера із зумом Acti Kcm-5211e підтримує самі передові кодеки для стискування відео, що економить місце на реєстраторові. Ультрасучасна камера з оптичним зумом підтримує таку функцію як детектування руху, що дозволяє включати запис тоді, коли це потрібно.

Відеокамера мережева 4-х мегапіксельная день/ніч для установки зовні приміщення, M-jpeg/mpeg-4/h.264, до 8 к/с при 2032x1920(4mp), 15 к/с при 1920x1080(2mp), 30 к/с при 1280 x 720(1mp), колір: 0,1 лк, Ч/Б: 0,05 лк, ZOOM 18х оптич., автодіафрагма, f4.7-84.6/f1.6-2.8, 48.94-3.61, багатовіконний детектор руху, POE (Class 3) /dc12v, дуплексний звук, вбудований web-сервер.

Візорні камери серії LIXUS-I PN



Рис. 3.7 – Камера серії LIXUS-I PN

Це автономні контрольно-вимірювальні системи з високою роздільною здатністю. Вбудована система обробки сигналу точно оцінює кожний вимір. Камера вивчає отримані при вимірюванні результати, проводить їх фільтрацію і при виявленні порушення необхідних допусків може втручатися

безпосередньо у виробничий процес. Камери є зовнішніми асинхронними тригерами. При встановленні декількох систем, вони можуть бути пов'язані в єдину систему і синхронізовані.

Універсальність застосування досягається шляхом підбору конфігурації обробки сигналів. Функціональність камери постійно оновлюється за рахунок нових розробок. Управління камерою здійснюється за допомогою зручного меню в програмному забезпеченні. Після введення і збереження необхідних налаштувань, камери серії LIXUS PN працюють в автономному режимі.

Камери LIXUS PN можуть управлятися в ручному або в автоматичному режимі, з можливістю змінювати чіткість і контрастність. При зміні освітленості місця виміру, камери самостійно змінюють обробку сигналу, гарантуючи тим самим оптимальну роботу при зміні навколишніх умов. Для використання в екстремальних умовах може бути поставлений спеціальний корпус.

Таблиця 3.2 – порівняльна таблиця приладів серії LIXUS-I PN

Модель	2048-C	2048-09	2048-19	5000	6144	7926	8192
Кількість пік селів	2048	2048	2048	5000	6144	7926	8192
Розмір пікселів (мм х мм)	14 x 14	10 x 10	10 x 10	7 x 7	7 x 7	7 x 7	7 x 7
Розміри (мм х мм х мм)	86x86x197	86x86x197	86x86x197	86x86x197	86x86x197	86x86x212	86x86x212

Особливості LIXUS-I PN

- Автономна контрольно-вимірювальна система;
- Вбудована система обробки сигналу;
- Висока роздільна здатність;
- Гальванічно розділені цифрові входи та виходи;

- Аналогові входи/виходи;
- Асинхронний тригер.

Таблиця 3.3 – Порівняльна таблиця характеристик камер

Параметри	NOVUS NVC- HC530-2	Acti Kcm- 5211e	LIXUS-I PN 2048-C	Novus NVIP- 2DN3000H/IR- 1P
Кількість пікселів	2mpix	4mpix	2mpix	2mpix
Розмір пікселів, мм x мм	10x10	10x10	14x14	10x10
Збільшення, раз	4	18	8	18
Вага, г	220	300	400	602

3.3 Лабораторний макет для вимірювання геометричних параметрів

Шляхом експериментальних досліджень було створено лабораторний макет зображений на рисунку 3.7. Але з додатковими двома об'єктивами 1, 2. Об'єктив 1 – це об'єктив «Индустар-50У-1 3,5/53», а 2 – це «PancolarCarlZeissJena DDR 1,8/50».

Об'єктив «Индустар-50У-1 3,5/53»

Чотирьохлінзовий анастигмат. Лінзи об'єктива просвітлені. Об'єктив володіє великою роздільною силою особливо в центрі поля і дає хорошу якість зображення. Призначений для використання при роботі на Фотозбільшувачі з розмірами кадрів 2,4х3,6 см.

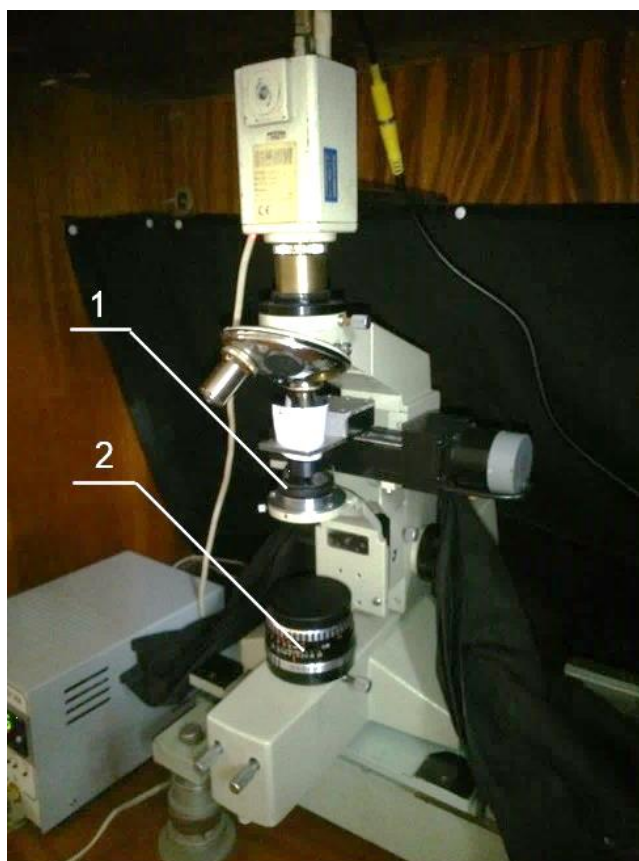


Рис. 3.7 – Лабораторний макет

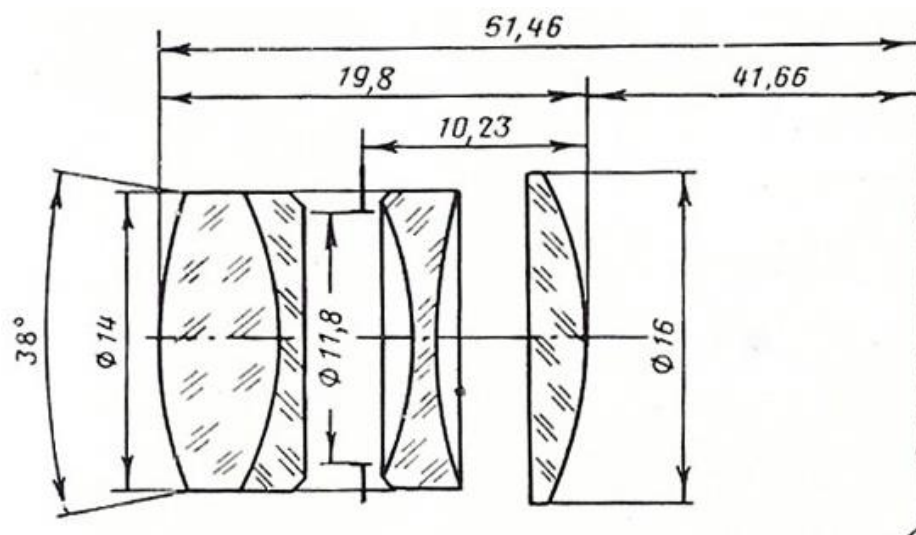


Рис. 3.8 – Оптична схема об'єктива «Индустар-50У-1 3,5/53»

Об'єktiv «PancolarCarlZeissJena DDR 1,8/50»

Надійний конструктив: виключно метал і скло, вага – 250 гр., хід кільця фокусування дуже м'який, плавний, тихий, досить легкий. Довжина 43 мм, фільтр – 49 мм, максимальна діафрагма $f/1.8$, мінімальна – $f/2.2$, фокусна відстань – 50 мм.

У об'єктива CarlZeissJenaPancolar 50 mm $f/1.8$ присутня стрибача діафрагма, збоку невеликий достатньо тугий металевий перемикач А-М. Діафрагма 1.8-22 з полустопами.

При використанні телевізійних засобів для вимірювання геометричних параметрів об'єкту джерелом випромінювання є сам об'єкт або його поверхня, освітлена стороннім джерелом. Частина потоку випромінювання об'єкта потрапляє через об'єktiv на світлочутливий шар ПЗЗ і створює на ньому оптичне зображення об'єкта, яке перетворюється в сигнальні електрони.

Сигнальна характеристика ПЗЗ-матриці зазвичай відображається як графік залежності величини сигналу (A) від освітленості пікселя (E'). У зв'язку з тим, що освітленість пікселя величина пропорційна відносному отвору діафрагми об'єктива можна отримати інтегральну сигнальну характеристику камери як графік залежності величини сигналу від величини відносного отвору. Тому було проведено експеримент на лабораторному стенді, що являє собою телевізійний мікроскоп, який підключений до комп'ютера і спеціального програмного забезпечення OWLEYE. Між джерелом випромінювання і камерою був встановлено два об'єктиви, в одному з яких є можливість змінювати величину відносного отвору з фіксованими значеннями, а в іншому плавно.

Було проведено вимірювання сигналу на кожному значенні відносного отвору і побудовано графік залежності величини сигналу від величини відносного отвору, який наведено на рисунку 3.9.

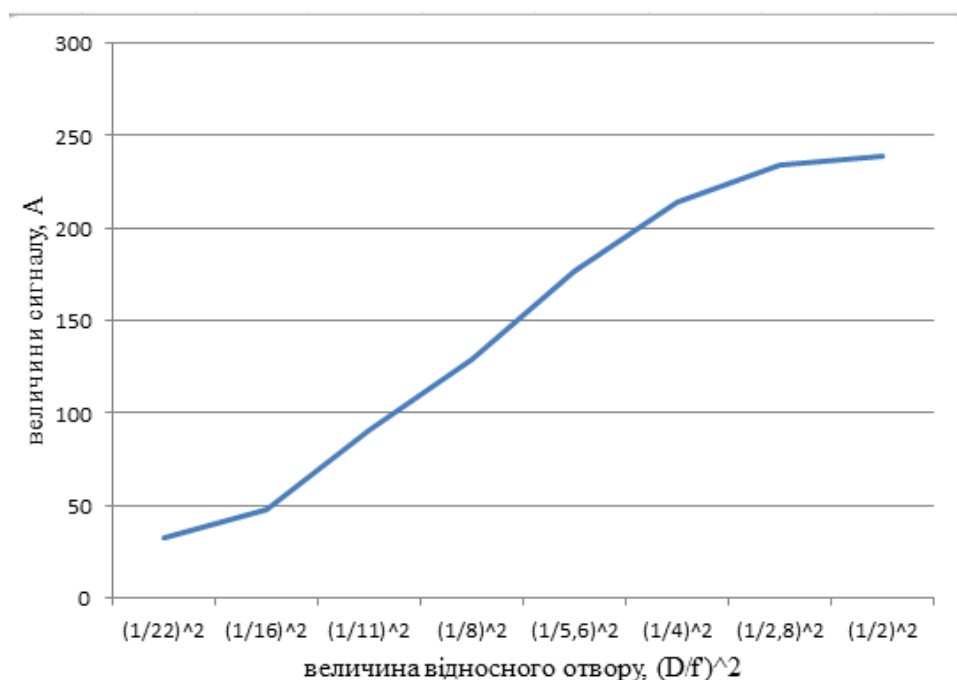


Рис. 3.9 – Світлосигнальна характеристика лабораторного макету з двома об'єктивами

Як видно з графіка, зображеного на рисунку 3.9 було отримано лінійну область сигнальної характеристики на значеннях сигналу більше 180 умовних одиниць(у. о.). Відомо, що після 180 у. о. йде насичення ПЗЗ-матриці і крива загибається.

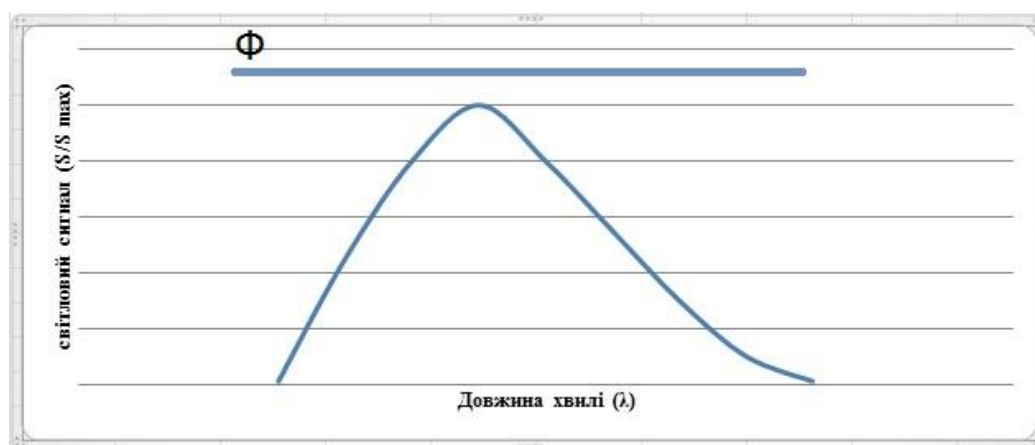


Рис. 3.10 – Спектральна характеристика розробленого приладу

На рисунку 3.10 зображено спектральну характеристику приладу та скорегований рівномірний по довжинам хвиль сигнал(Φ).

$$A = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi S d\lambda \quad (3.1)$$

Якщо ми будемо змінювати яскравість то сигнал Φ буде змінюватись і інтеграл буде змінюватись нерівномірно, так як спектральна характеристика несиметрична.

Тому треба знімати характеристику на одній довжині хвилі. Але так як в нас немає можливості знімати на одній довжині хвилі, то було обрано фільтр Φ -0,8, що має спектральну ширину полоси пропускання ~ 5 нм, який дає нам можливість знімати на вузькій області. Яку можна вважати квазімонохроматичною.

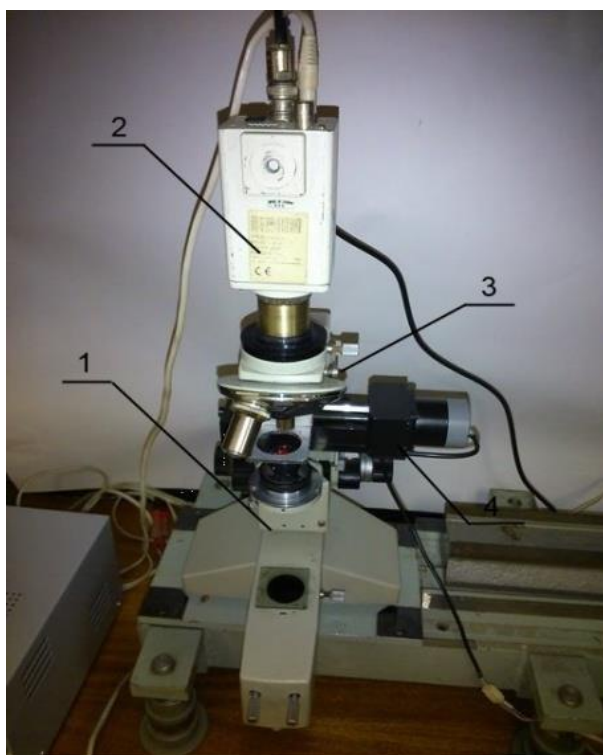


Рис. 3.11 – Лабораторний макет

- 1) мікроскоп «Біолам Л-211», 2) ПЗЗ-камера NOVUS NVC-NC530-2,
3) освітлювальний блок, 4) вузол переміщення об'єкту

Мікроскоп «Біолам Л-211» призначається для дослідження кристалічних та інших прозорих об'єктів в минаючому (звичайному і поляризованому) світлі в ортоскопічному і кіноскопічному ході променів. Мікроскоп

застосовується для масових робіт в мінералогії, петрографії, кристалографії, а також в біології, хімії, медицині та інших галузях науки і техніки.

Мікроскоп біолам Л-211 входить в серію агрегатних поляризаційних мікроскопів минаючого і відбитого світла, які розрізняються комплектацією агрегатних вузлів та приладдя. На відміну від раніше випущених моделей робочих поляризаційних мікроскопів, нова модель має наступні переваги:

- Накладні освітлювачі замінені на освітлювальну систему, вбудовану в підставу, що дозволить підвищити надійність і скоротити час налаштування освітлення.
- Щипцевий пристрій зміни об'єктивів замінено на п'ятигніздова Револьверний пристрій з центрованими гніздами, що підвищить зручність роботи і скоротить час на настройки приладу.
- Введено новий конденсор, який забезпечує більш зручне і швидке перемикання діафрагм і надійну їх центрування при роботі за методами фокального екранування.
- Мікроскоп оснащений комплектом об'єктивів - планахроматов і компенсаційних окулярів, що дозволило поліпшити якість зображення в приладі.

Таблиця 3.4 - Характеристики ПЗЗ-камери NOVUS NVC-HC530-2

Тип ПЗЗ-матриці	ПЗЗ 1/3 дюйми , SONY SuperHAD HQ1 DSP
Кількість пікселів	752(Г) x 582(В)
Роздільна здатність	540 ТВ-ліній
Робоча температура	-10°C ~ 50°C
Розміри	124 (Ш) x 62 (В) x 57 (Г)
Вага	220 г

В склад освітлювального блоку входить лампа розжарювання кварцева галогенна малогабаритна КГМ 9-70.

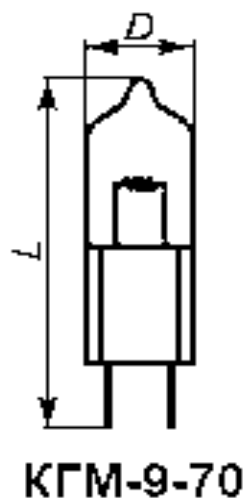


Рис. 3.12 – Лампа розжарювання КГМ 9-70

Таблиця 3.5 Основні технічні характеристики лампи КГМ 9-70

Номінальна напруга	9 В
Номінальна потужність	70 Вт
Світловий потік	21 лм
Колірна температура	3000 К
Середній час горіння	200 год
Довжина	44 мм
Діаметр	11 мм
Тип цоколя	Без цоколя

До складу вузла переміщення досліджуваного об'єкту входять:

- П'єзoeлектродвигун;
- Блок керування;
- Каретка, що переміщується лінійно;

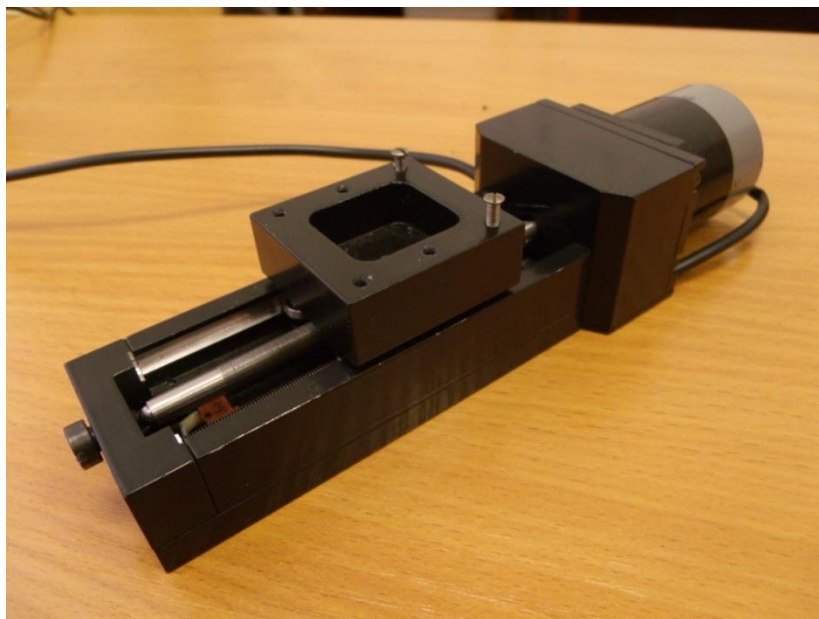


Рис 3.12 – П'єзоелектродвигун з рухомою кареткою



Рис. 3.13 – Електронний блок керування



Рис 3.14 - П'єзоелектродвигун PM-20R

П'єзоелектродвигун PM-20R реверсного обертання призначений для формування як безперервного так і крокового режимів обертання, а також точного кутового позиціонування.

Коли двигун знеструмлений, він працює як зберігач положення. Двигун виконаний у єдиному алюмінієвому корпусі і з'єднується з драйвером через спеціальний кабель. Управління двигуном здійснюється за допомогою драйвера "RM". Дозволяють створювати: жорсткі без люфтові і безредукторні електромеханічні виконавчі механізми з низькою швидкістю обертання і переміщень; електромеханічні пристрої, ефективно замінюють силові електроприводи, електромагніти та інші електромеханічні пристрої.

3.4 Дослідження впливу налаштувань відеопроцесора на світлосигнальну характеристику.

Для обробки та перетворення отриманого сигналу з відеокамери на комп'ютер використовується відео процесор. В якому є можливість

змінювати контраст (амплітуду) і яскравість (піднімає одночасно і мінімальне і максимальне значення) отриманого сигналу.

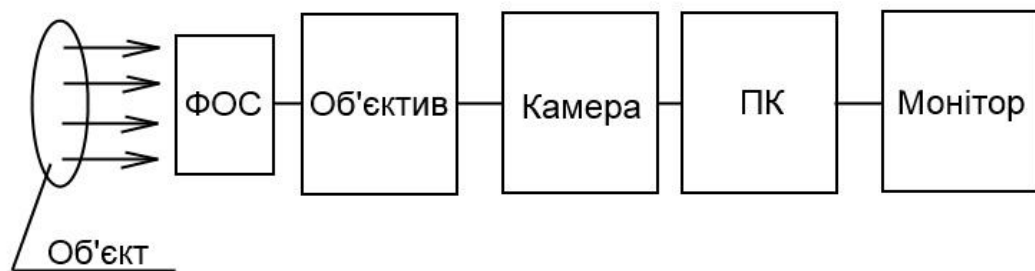


Рис. 3.15 – Структурна схема ОЕП, де
ФОС – формувач оптичного сигналу

3.4.1 Методика виконання експерименту

Спочатку виконується налаштування лабораторного макету, за допомогою блока живлення подається на лампу розжарення такий струм і напругу щоби значення отримати значення сигналу ~ 200 у. о.

Далі між джерелом випромінювання (тобто лампою розжарення) і ПЗЗ-матрицею встановлюється фільтр НС-6 і записуються значення сигналу, що отримуються в програмі OWLEYE. За тим прибирається фільтр НС-6 і за допомогою ірисової діафрагми блока освітлення послаблюється випромінювання об'єкта до значення отриманого з фільтром. Потім знову встановлюється фільтр і записуються значення. Надалі так само забирається фільтр, послаблюється сигнал за допомогою ірисової діафрагми і встановлюється фільтр. Виконуються такі дії до того моменту поки сигнал не стане ~ 3 у. о.

3.4.2 Розрахунок і побудова світлосигнальної характеристики

За замовчанням в відео процесорі встановлено яскравість 5000 у. о. В ході експерименту було встановлено яскравість на 5429 і 4927. І як видно з графіків зображених на рисунках 3.16, 3.17 крива послаблення сигналу загибається на малих значеннях. Крива послаблення сигналу – це залежність

натурального логарифму значення сигналу (отриманого за допомогою програмного забезпечення OWLEYE) від кількості вимірювань, за допомогою якої можна зробивши певні розрахунки отримати світлосигнальну характеристику.

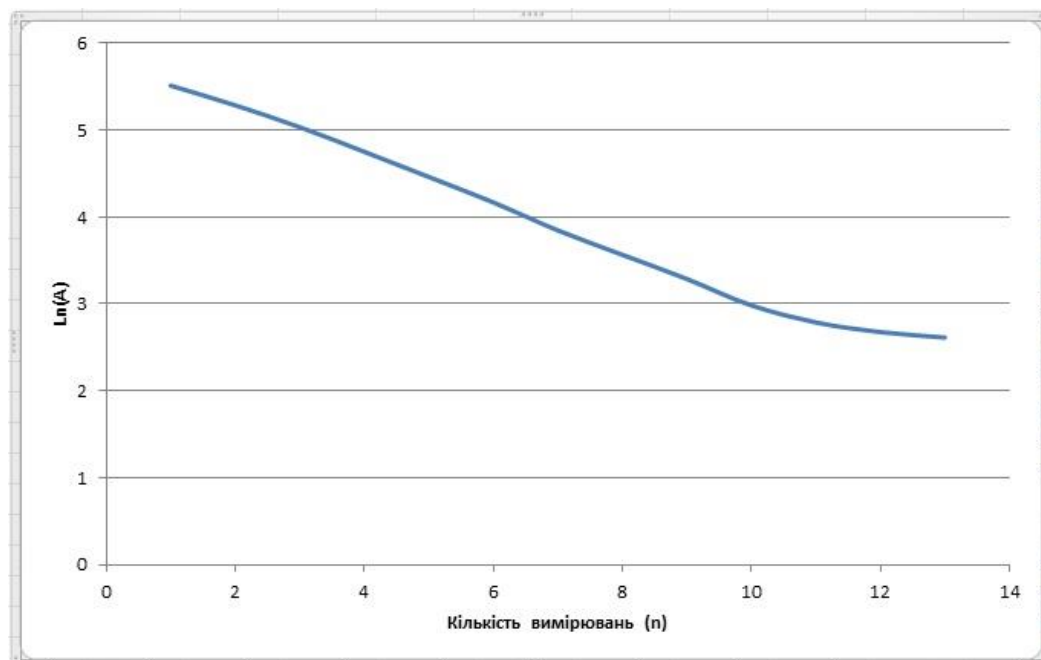


Рис. 3.16 – Крива послаблення сигналу при яскравості 5429

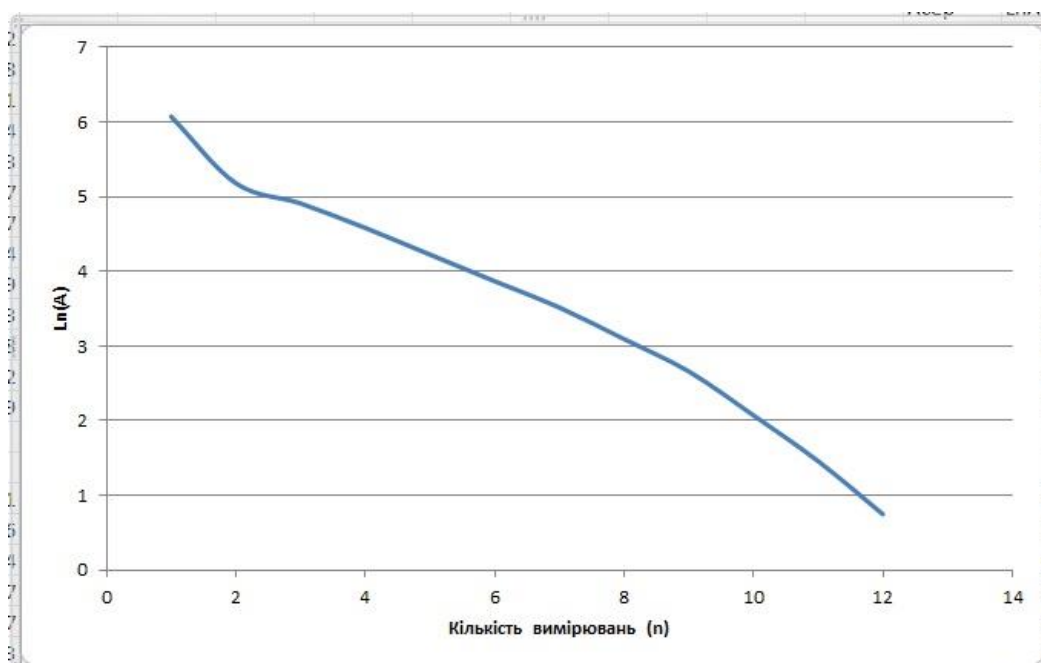


Рис. 3.17 – Крива послаблення сигналу при яскравості 4927

Було знайдене значення оптимальне значення яскравості 5029 у. о. Результат вимірювання на цьому значенні показано на рисунку 3.18.

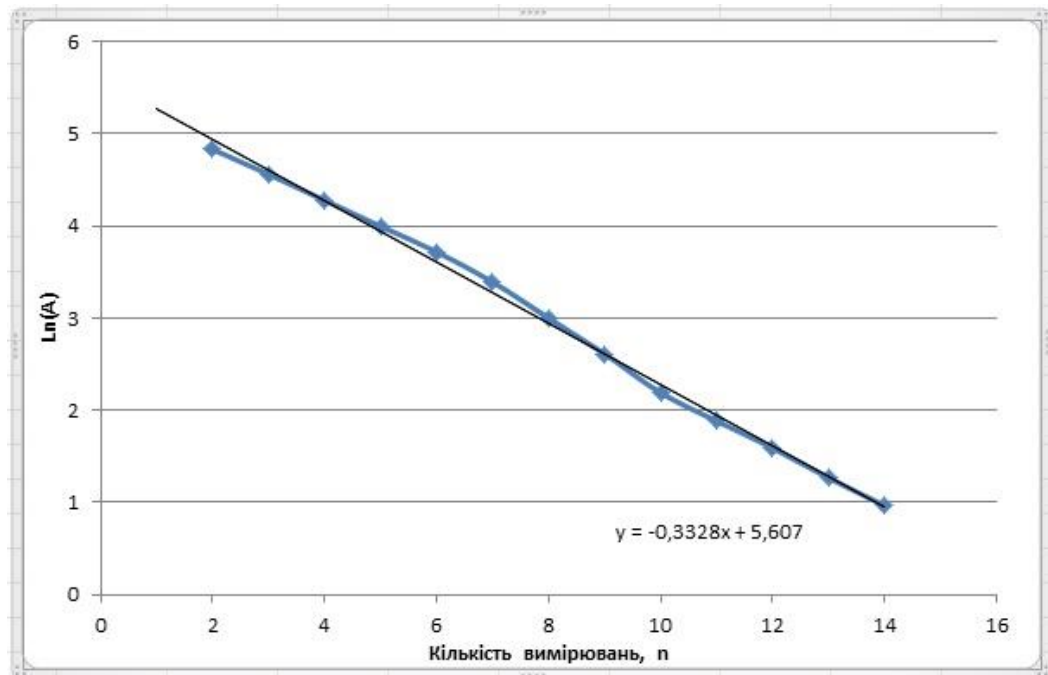


Рис. 3.18 - Крива послаблення сигналу

Відомо, що закон Ламберта-Бугера-Бера визначає ослаблення пучка світла при поширенні його через поглинаюче середовище і записується як

$$M_0 = M_1 e^{-k_\lambda l}, \quad (3.2)$$

де, M_0 – початковий потік випромінювання;

M_1 – потік випромінювання після проходження пучка світла через середовище поглинання;

k_λ – коефіцієнт поглинання середовищем, що залежить від довжини хвилі пучка світла;

l – товщина середовища, через яке проходить світло.

Цей закон можна застосувати і для телевізійної вимірювальної системи, але з певними корективами. Замість потоку випромінювання ставимо значення сигналу(A), отриманого за допомогою програми OWLEYE, а замість $-k_\lambda l$ просто коефіцієнт $-\beta$. Тепер закон Ламберта-Бугера-Бера набув вигляду 3.3

$$A_0 = A_1 e^{-\beta}. \quad (3.3)$$

Висновки до розділу 3

В даному розділі обрані головні комплектуючі оптико-електронного приладу для визначення геометричних розмірів шкал-та сіток, а саме, це мікроскоп Біолам Л-211, ПЗЗ-камера NOVUS NVC-HC530-2, та розроблена додаткова каретка с п'єзoeлектродвигуном. Було визначено методику експерименту та визначено що спочатку виконується налаштування лабораторного макету, за допомогою блока живлення подається на лампу розжарення такий струм і напругу щоби значення отримати значення сигналу ~ 200 у. о.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ НА ПРИЛАДАХ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ

4.1 Досліджуваний об'єкт

Досліджуваним об'єктом було обрано міру штрихову для визначення роздільної здатності телескопічних систем за ГОСТ 15114-78.

Міра складається з 25 елементів і двох пар паралельних, рівновіддалених одна від одної позначок, відстань між якими називається базою міри і визначає масштаб.

Кожний елемент міри складається із чотирьох груп паралельних штрихів, рівних по ширині та довжині і розміщених як показано на рисунку

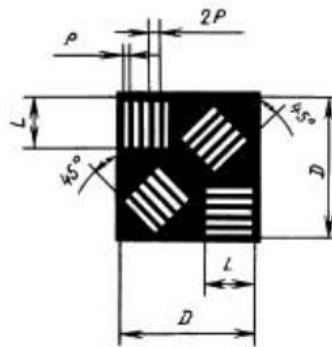


Рис. 4.1 – Фрагмент міри

4.2 Метод визначення геометричних розмірів шкал та сіток

Запропонований метод визначення геометричних розмірів мікрооб'єкту, зводиться до визначення геометричних розмірів за допомогою оптико-електронного приладу.

Оптико-електронний прилад працює з програмним забезпеченням, яке визначає розміри в пікселях, тому, розмір необхідно перевести в мікрметри. Переведення пікселей в мікрметри відбувається за наступною методикою.

Визначення розміру об'єкта за формулою:

$$R_i = K \cdot r_{\text{ОЕП}}, \quad (4.1)$$

де K – коефіцієнт пропорційності;

$r_{ОЕП}$, - розмір об'єкта, виміряний телевізійною вимірювальною системою.

$$K = r_{ОЕП} / r_m, \quad (4.2)$$

де r_m – розмір штриха міри, мкм;

$r_{ОЕП}$ - розмір штриха міри, виміряний телевізійною вимірювальною системою, мкм.

$$r_{ОЕП} = n_{сер} \times l_{pix} \quad (4.3)$$

Запропонований метод вимірювання є простим в застосуванні і більш економним, в порівнянні з існуючими методами, що є його плюсом.

4.3 Експериментальні дослідження параметрів тестових об'єктів на прикладі штрихових мір

Роль оптичних методів контролю різко зросла з появою персональних комп'ютерів і малогабаритних комп'ютерних телекамер. Вони дозволили повністю автоматизувати всі необхідні розрахунки, виключивши при цьому підготовчі операції. Застосування комп'ютерів і телекамер дало можливість за допомогою того самого приладу вимірювати різні характеристики об'єктів, в тому числі геометричні розміри. Світлова мікроскопія є основним інструментом для дослідження в різних галузях науки. З'явилась можливість досліджувати мікрооб'єкти значно менші по розміру від традиційних в світловій мікроскопії та на відміну від електронної мікроскопії з живими препаратами. Телевізійна схемотехніка в мікроскопії суттєво спростила проблему обробки зображень. Телевізійна апаратура в поєднанні з сучасними засобами обчислювальної техніки значно полегшує обробку великої кількості різноманітних вимірювань мікрооб'єктів.

4.3.1 Методика калібрування ОЕП

- 1) Встановити міру на столик мікроскопу
- 2) Ввімкнути живлення мікроскопу та усіх інших необхідних приладів ТІВС- телевізійна камера ,комп'ютер ,монітор).
- 3) Запустити на комп'ютері програму "Owleye".

4) Встановити міру (ГОСТ 15114-78) на предметний столик мікроскопу.

5) Обрати поле штрихів міри та його номер (n). За ГОСТ 15114-78 знаходимо значення реальних штрихів обраного поля міри r_m .

6) У програмному забезпеченні Owleye встановлюємо вимірювання за лінією ,налаштовуємо лінію поперек обраного поля міри.(рис. 4.2).

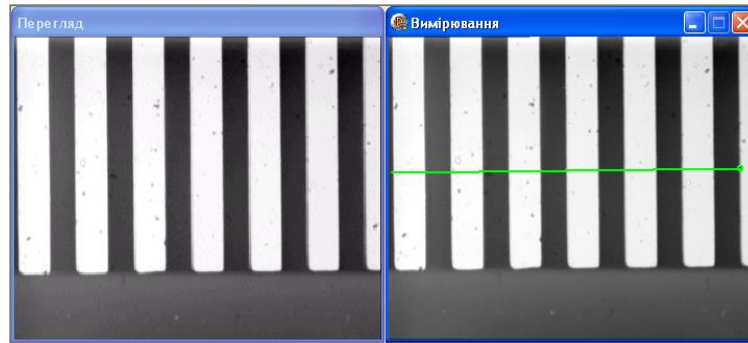


Рис. 4.2 – Зображення міри у програмному забезпеченні

7) Обчислюємо значення K,

де K – коефіцієнт пропорційності, або збільшення мікроскопа.

4.3.2 Дослідження коефіцієнта пропорційності телевізійної інформаційно-вимірювальної системи на основі телевізійної камери Novus NVC 530H.

За методикою наведеною у пункті 4.3.1 отримали значення, які наведені у таблиці 4.1.

1) Вхідні параметри для вимірювання:

Довжина лінії, піх: 224.

Номер міри : 1.

Номер поля міри : 2.

Розмір r_m за ГОСТ 15114-78 : 9,4 мкм.

Лінійні розміри пікселя ПЗЗ-матриці телевізійної камери $l_{pix}=6\times6$ мкм.

Інтервал вимірів : 0,5 сек.

Кількість вимірювань на цикл: 25 вимірювань.

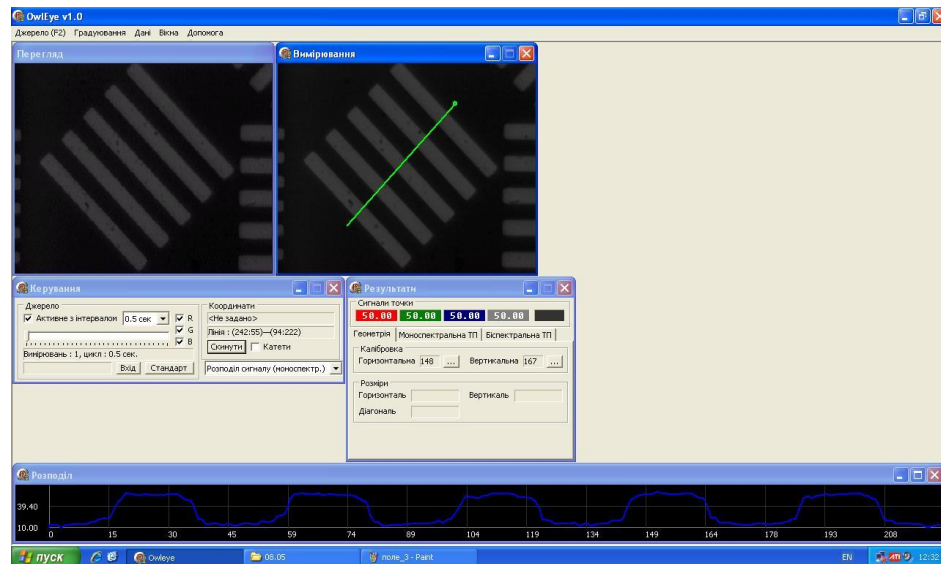


Рисунок 4.3 - Вікно керування

- 2) Встановлюємо лінію поперек штрихів отриманого поля міри.
- Отримуємо розподіл сигналів вздовж лінії

Таблиця 4.1-Експериментальні дослідження коефіцієнта пропорційності

№ пікселя	У.О. АЦП	№ пікселя	У.О. АЦП	№ пікселя	У.О. АЦП	№ пікселя	У.О. АЦП
1	2	3	4	5	6	7	8
1	10	58	20	114	59	170	17
2	13	59	23	115	57	171	13
3	13	60	23	116	57	172	16
4	10	61	34	117	56	173	14
5	10	62	51	118	59	174	15
6	9	63	55	119	54	175	15
7	13	64	56	120	54	176	15
8	13	65	58	121	52	177	16
9	13	66	58	122	51	178	14
10	16	67	58	123	47	179	13
11	17	68	57	124	38	180	15
12	20	69	58	125	21	181	12
14	20	70	57	126	17	182	14
15	21	71	57	127	17	183	14
16	21	72	57	128	16	184	15
17	24	73	57	129	14	185	16
18	36	74	56	130	13	186	15

Продовження таблиці 4.1

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
19	43	75	55	131	15	187	22
20	50	76	56	132	15	188	22
21	55	77	54	133	15	189	38
22	57	78	54	134	15	190	50
23	56	79	51	135	15	191	52
24	56	80	49	136	15	192	50
25	57	81	45	137	15	193	54
26	56	82	27	138	15	194	55
27	56	83	17	139	15	195	55
28	56	84	17	140	15	196	55
29	55	85	15	141	16	197	55
30	52	86	10	142	15	198	55
31	54	87	13	143	17	199	56
32	56	88	16	144	17	200	56
33	54	89	15	145	22	201	54
34	51	90	14	146	36	202	55
35	52	91	13	147	48	203	54
36	51	92	13	148	52	204	58
37	49	93	13	149	56	205	57
38	40	94	15	150	54	206	55
39	21	95	15	151	58	207	52
40	21	96	15	152	59	208	50
41	14	97	19	153	58	209	40
42	12	98	15	154	56	210	24
43	12	99	16	155	57	211	21
44	12	100	19	156	57	212	21
45	14	101	17	157	57	213	16
46	15	102	22	158	57	214	17
47	15	103	26	159	57	215	15
48	12	104	36	160	57	216	14
49	14	105	47	161	56	217	14
50	14	106	54	162	55	218	13
51	15	107	51	163	55	219	13
52	15	108	51	164	54	220	12
53	15	109	52	165	55	221	12
54	16	110	57	166	38	222	13
55	19	111	56	167	21	223	12
56	17	112	57	168	21	224	12
57	19	113	62	169	20		

3) Експортуємо данні у файл .csv.

4) Оброблюємо результати вимірювань. Знаходимо:

4.1) Кількість світлих штрихів міри, що перетинає лінія

$$m_{св}=5$$

4.2) Кількість пікселів в межах кожного світлого штриха

$$n_1=33$$

$$n_2=32$$

$$n_3=32$$

$$n_4=29$$

$$n_5=28$$

4.3) Знаходимо середнє значення кількості пікселів у білих штрихах міри

$$n_{сеп} = \frac{33+32+32+29+28}{5} = 31 \quad (4.4)$$

$$r_{МОЕП} = 31 \times 6 = 186 \text{ мкм} \quad (4.5)$$

4.4) Обраховуємо значення K – коефіцієнт пропорційності за формулою

$$K_{PROP} = r_{MTIBC} / r_m, \quad (4.6)$$

$$K_{PROP} = r_{MTIBC} / r_m = \frac{186}{9.4} = 19.7 \quad (4.7)$$

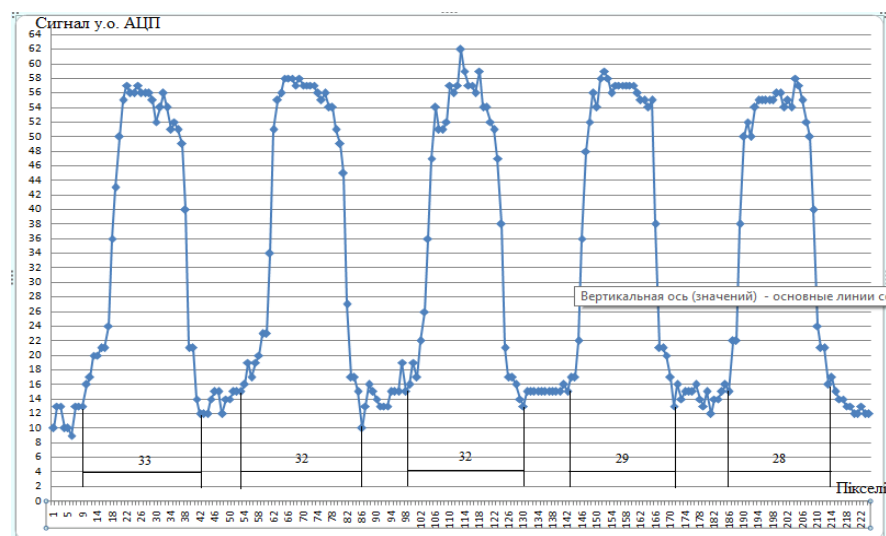


Рис. 4.4 - Експериментальне дослідження. Визначення розмірів штрихів міри у пікселях

4.4 Аналіз освітленості матриці телевізійної вимірювальної системи

Від якості освітлення об'єкту залежить якість отриманого зображення і відповідно точність визначення геометричних параметрів об'єкту.

Тому виникло питання експериментально дослідити та провести аналіз матриці телевізійної вимірювальної системи. В нашій вимірювальній системі світло - електричним перетворювачем є ПЗЗ - матриця телевізійної камери Novus NVC-130 ВН, що входить до структури вимірювальної системи, тому об'єктом для дослідження обрано саме її.

Метою дослідження було отримання об'ємного зображення освітленості ПЗЗ – матриці при різному освітлені матриці. Для проведення експериментального дослідження, в структуру нашої телевізійної вимірювальної системи було внесено об'єктив Pentacon Auto 1.8/50. За допомогою об'єктиву ми змінювали освітлення, що попадає в оптичну частину системи, потім на матрицю камери, за допомогою зміни відносного отвору об'єктиву. При вимірюваннях було використано світлофільтр ФІ-08, який має довжину хвилі максимуму полоси пропускання $\lambda_{cp} = 632,8$ нм, спектральну ширину полоси пропускання 5,5 нм на рівні 0,5 та 9,9 нм на рівні 0,1. Фільтр включаємо для того, щоб отримати вузьку область пропускання.

Налаштовуємо вимірювальну систему таким чином, щоб отримати максимальний сигнал в точці рівний $A = 200$ у.о. при відносному отворі діафрагми об'єктиву $D/f' = 1/1,8$, що входить в вимірювальну систему. Необхідний сигнал отримали при напрузі на освітлювальному блоці ТВС рівній 8,3 вольт та при стабілізації струму 6,8 ампер.

Після того, як ТВС отримала максимальний сигнал в точці, розпочинаємо виконувати сканування поверхні отриманого зображення, тобто поверхні, яка сприймає освітленість. Дослідження проводимо при

відносному отворі апертурної діафрагми об'єктиву $D/f' = 1/1,8$. Отримані результати представлено на рис.

Під час досліджень значення відносного отвору апертурної діафрагми об'єктиву змінювали на $1/2,8$, $1/4$, $1/5,6$. А результати досліджень при різних значеннях відносного отвору апертурної діафрагми об'єктиву, представлено на рисунках.

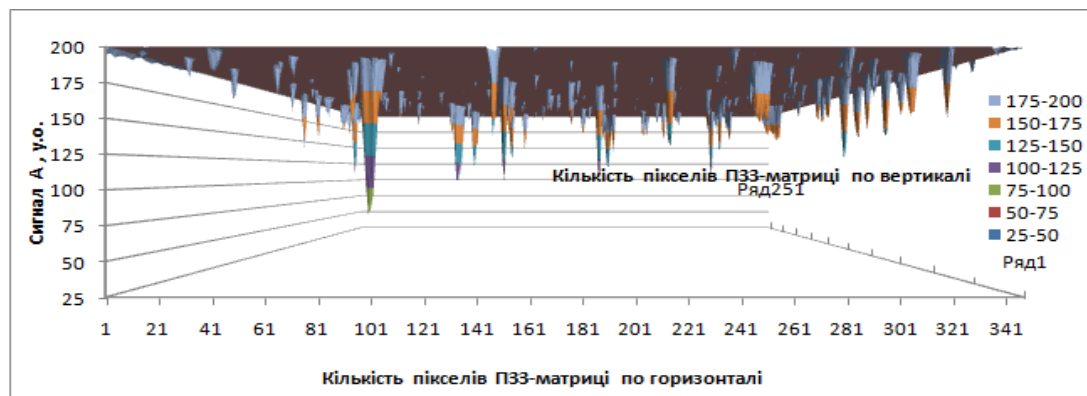


Рис. 4.5 – Об'ємне зображення освітленості ПЗЗ – матриці камери Novus NVC-130
ВН при $D/f' = 1/1,8$

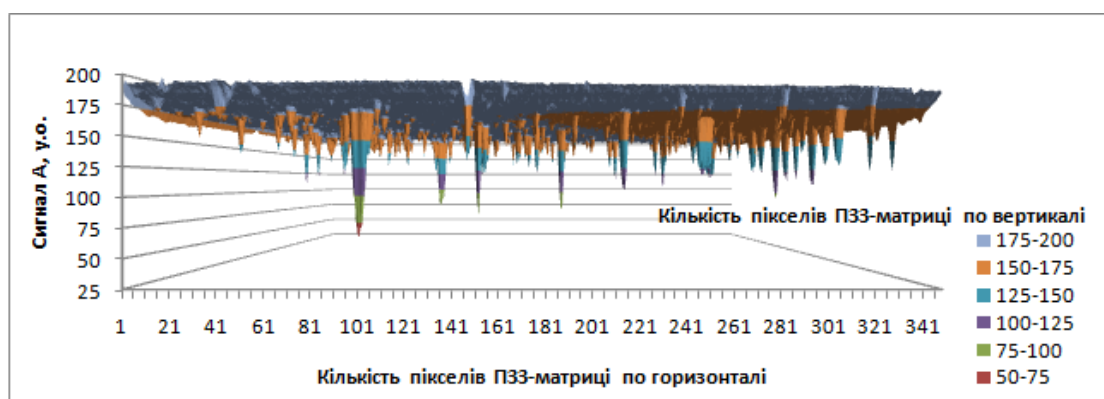


Рис. 4.6 – Об'ємне зображення освітленості ПЗЗ – матриці камери Novus NVC-130
ВН при $D/f' = 1/2,8$

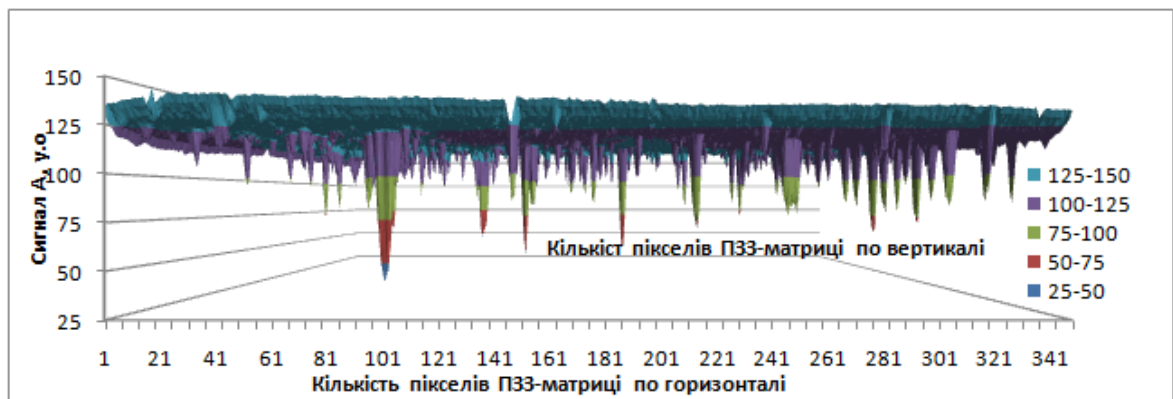


Рис. 4.7 – Об’ємне зображення освітленості ПЗЗ – матриці камери Novus NVC-130

$$\text{ВН при } D/f' = 1/4$$

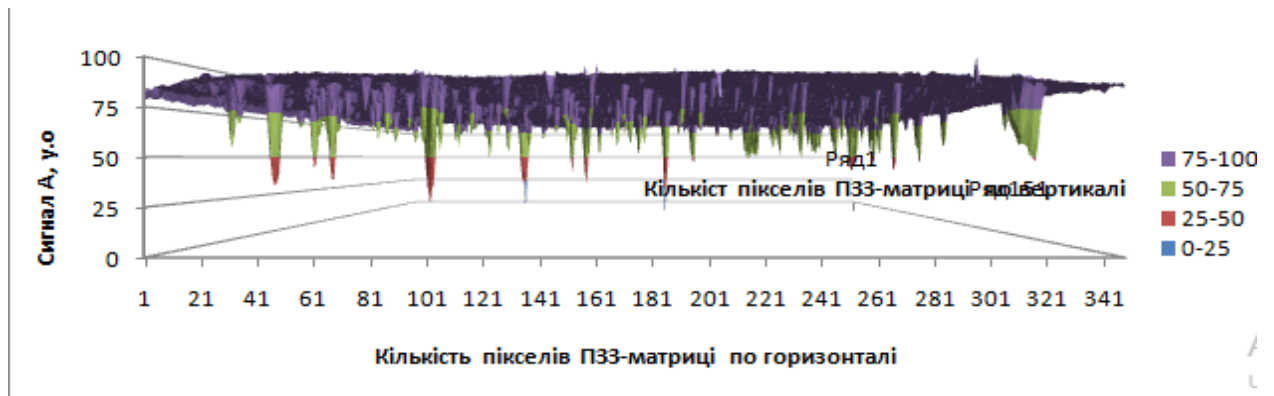


Рис. 4.8 – Об’ємне зображення освітленості ПЗЗ – матриці камери Novus NVC-130

$$\text{ВН при } D/f' = 1/5,6$$

З графіків об’ємного зображення освітленості ПЗЗ – матриці камери Novus NVC-130 ВН при різних значеннях відносного отвору апертурної діафрагми видно, що при зміні рівня сигналу, залишаються незмінними місцерозташування та форма найвищих піків. При зменшенні рівня сигналу, з’являються нові низькі піки. З аналізу графіків видно, що найкраще проводити експериментальні дослідження та вимірювання при рівні сигналу $A = 200$ у.о. Тому, що при такому сигналі, є можливість обрати зону вимірювання камерою, так щоб оминати високі піки, де освітленість ПЗЗ –

матрицею камери не сприймається відповідно до рівня сигналу освітленості, що було подано на відповідний пікселя, де знаходиться пік.

Попередні дослідження освітленості матриці камери було проведено самою телевізійною вимірювальною системою, тому постала задача провести вимірювання освітленості матриці незалежним приладом. Для цього було спроектовано фотометр. Загальний вигляд телевізійної вимірювальної системи з підключеним фотометром представлено на рисунку 4.9.



Рис. 4.9 – Телевізійна вимірювальна система з підключенням фотометру

Датчиком фотометру обрано кремнієвий фотодіод. Оскільки вихідний сигнал фотодіоду низький, необхідно було розробити підсилення сигналу. В нашій схемі для підсилення сигналу фотодіоду було спроектовано три схематичних рішення (1 КОм, 100 КОм, 1 МОм). При експериментальних дослідженнях освітленості матриці ми використовували підсилення (1МОм). Вся схема фотометру виконана в єдиному корпусі, але фотодіод спроектували таким чином, що існувала можливість закріплення його на відстані. Саме це конструкторське рішення дозволило закріпити фотодіод на кронштейні до двохкоординатної оптичної лави. Хочемо зазначити, що напруга від якої працює фотометр $U = 30$ вольт. А освітлювальний блок ТВС

було підключено до напруги рівній 4,8 вольт та при стабілізації струму 5 ампер.

За допомогою використання двокоординатної оптичної лави було проведено дослідження освітленості ПЗЗ - матриці камери Novus NVC-130 ВН ТВС по осі x і y по відношенню до освітлювального отвору, через який проходить освітлення на об'єкт від освітлювальної лампи мікроскопу, що входить в структуру вимірювальної системи. Переміщення двокоординатної оптичної лави дало змогу просканувати освітленість по всій поверхні предметного столику ТВС. Результатом сканування стало об'ємне зображення напруги, яка була вихідним сигналом фотометру. В подальшому було виконано перерахунок напруги в освітленість для кремнієвих фотодіодів. Отримане об'ємне зображення освітленості ПЗЗ - матриці камери Novus NVC-130 ВН зображення представлено на рисунку 4.10.

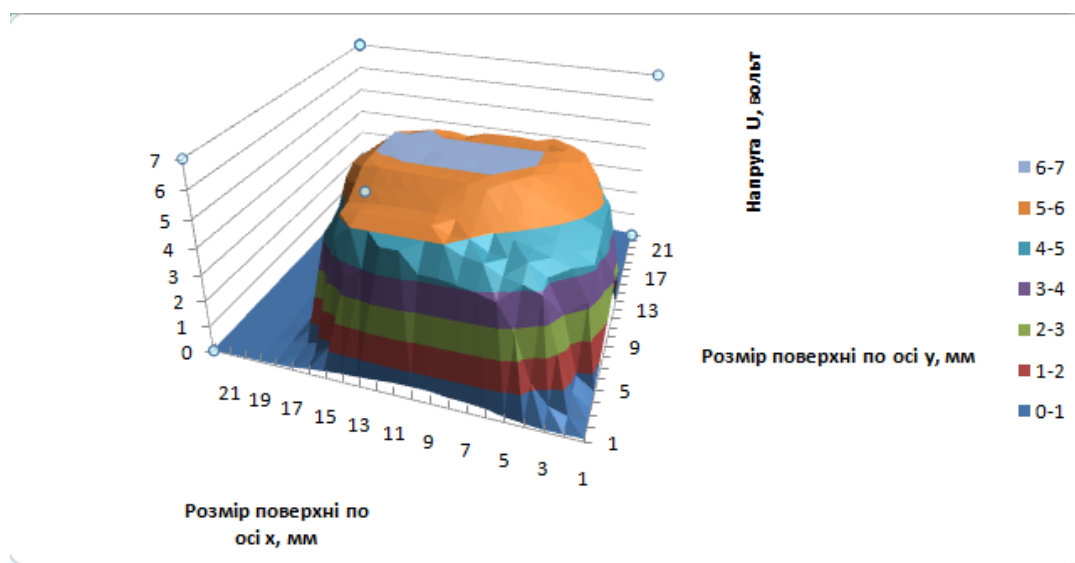


Рис. 4.10 – Об'ємне зображення освітленості ПЗЗ-матриці камери Novus NVC-130 ВН (вид з боку)

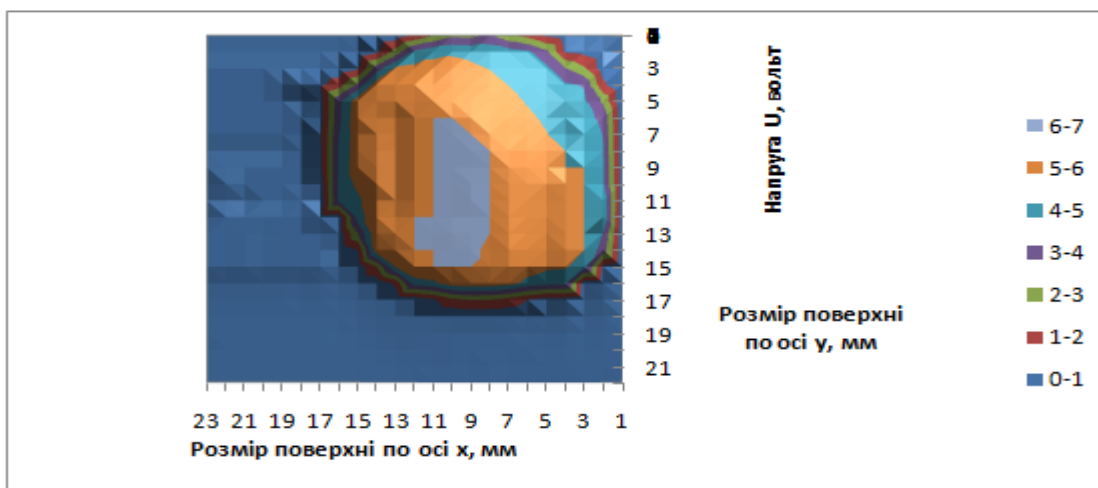


Рис. 4.11 – Об’ємне зображення освітленості ПЗЗ - матриці камери Novus NVC-130 ВН (вид зверху)

Для аналізу освітленості ПЗЗ – матриці камери Novus NVC-130 ВН було проведено додаткове експериментальне дослідження, що змогло дати більше інформації про освітленість матриці ТВС. А саме, експериментально визначити чи однаково буде змінюватись залежність сигналу від освітленості об’єкту дослідження при перекритті освітлювального отвору ТВС по осі x і по осі y . Для цього було спроектовано додаткову планку, таким чином, щоб вона перекривала повністю освітлювальний отвір і кріпилася до двокоординатної оптичної лави.

За допомогою зміщення спроектованої планки покроково на 1 мм., що забезпечує двохкоординатна оптична лава, було проведено дослідження освітленості ПЗЗ - матриці камери Novus NVC-130 ВН ТВС по осі x і y по відношенню до освітлювального отвору, через який проходить освітлення на об’єкт від освітлювальної лампи мікроскопу.

Дане експериментальне дослідження проводили на ТВС з використанням світлового фільтру ФІ-08. Для цього, на отриманому зображенні встановили точку А (). Під час всього дослідження значення координат точки не змінювалось.

Таблиця 4.2 – Перекриття отвору по осі Х

№ вимір.	1 У.О.	2 У.О.	3 У.О.	4 У.О.	5 У.О.	Н сеп.
X1	107,89	108,44	109,11	106,89	107,78	108,022
X2	107,67	108,33	106,56	107,44	108,44	107,688
X3	108,22	106,56	108,4	107	107	107,436
X4	105,67	104,33	106,44	104	104,78	105,044
X5	98,2	100,44	97,89	99	98,67	98,84
X6	93,67	91,44	92,22	95,22	91,44	92,798
X7	81,67	82,11	81,44	80,22	83,22	81,732
X8	66,33	68,67	67,22	66,22	66,56	67
X9	52,56	53,11	53,22	52,89	52,56	52,868
X10	38,22	38,44	35,44	36,78	40,22	37,82
X11	22,67	22,67	24	23	23,56	23,18
X12	13,11	10,33	12	13,67	10,67	11,956
X13	6	4,67	5,33	5,56	5,22	5,356
X14	1,33	1,44	1,11	2,44	0,89	1,442
X15	0,67	0,68	1,11	0,67	1,67	0,96
X16	1	1	1,11	0,89	0,89	0,978
X17	0,56	0,89	0,33	1	0,89	0,734

Таблиця 4.3 –Перекриття отвору по осі У

№ вимір.	1 У.О.	2 У.О.	3 У.О.	4 У.О.	5 У.О.	Н сеп.
Y1	107	106,31	106,37	104,23	106,39	106,06
Y2	104,33	106,39	107	106,7	105,98	106,08
Y3	106	106,3	106,2	106	106	106,1
Y4	101,67	103,78	103,22	101,33	102,67	102,534
Y5	101	100,44	99,44	99,89	100,44	100,242
Y6	95,67	95,44	97,67	94,78	94,33	95,578
Y7	88,56	89,56	89,11	87,22	91,89	89,268
Y8	79,89	78,78	78,44	79,56	78,11	78,956
Y9	65,22	66,22	67	66,78	67,44	66,532
Y10	50,33	50,56	51,22	49,78	50,78	50,534
Y11	33,33	31,33	33,1	32,89	32,33	32,596
Y12	12	12,56	12,78	14	13,56	12,98
Y13	3,44	2,1	2,33	2,22	8	3,618
Y14	2	1,8	1,8	2,3	2	1,98
Y15	2,33	1,1	1,78	2,78	1,9	1,978
Y16	1,56	1,22	1,78	1,11	1,22	1,378
Y17	1,22	1,22	2,44	2	2,56	1,888

Результатом дослідження стали залежності сигналу від освітленості, що зменшувалась на 1 мм при кожному кроці рисунок 4.4.8 та рисунок 4.4.9



Рис. 4.12 – Перекриття отвору по осі X



Рис. 4.13 – Перекриття отвору по осі Y

З графіків видно, що зображення по осі y і по осі x мають різкий спад на певному проміжку, це пов'язано з перекрыттям освітлювального отвору ТВС. В момент повного відкриття освітлювального отвору отримуємо лінійність рівня сигналу $A=107$ у.о. на обох залежностях. В момент закриття освітлювального отвору видно поступовий спад рівня сигналу до моменту повно перекрыття планкою освітлювального отвору ТВС до рівня сигналу $A=0$ у.о. На рисунку 4.13 лінійна ділянка залежності на рівні сигналу

$A=107$ у.о. більша ніж на рисунку 4.12. Це пов'язано з складністю встановлення планки чітко на межі освітлення об'єкту, тому початкова точка першого кроку зміщення планки по осі y була встановлена з запасом відстані більшим ніж при вимірюваннях по осі x на рисунку 4.13.

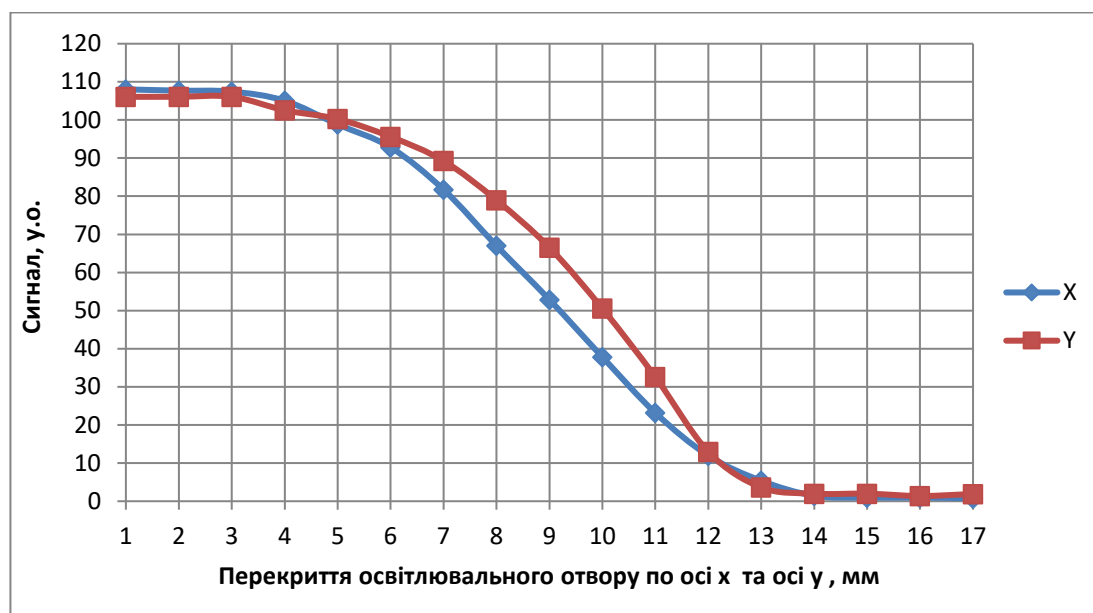


Рис. 4.14 – Перекриття лінійного отвору по осі x та y

З графіків видно, що ділянка спаду від рівня сигналу $A=107$ у.о. до $A=0$ у.о. на обох залежностях однакова.

Висновки до розділу 4

Роль оптичних методів контролю різко зросла з появою персональних комп'ютерів і малогабаритних комп'ютерних телекамер. Вони дозволили повністю автоматизувати всі необхідні розрахунки, виключивши при цьому підготовчі операції. Застосування комп'ютерів і телекамер дало можливість за допомогою того самого приладу вимірювати різні характеристики об'єктів, в тому числі геометричні розміри. Світлова мікроскопія є основним інструментом для дослідження в різних галузях науки.

Було обрано експериментальні дослідження та обґрунтовано їх важливість для визначення геометричних розмірів шкал і сіток. Від якості освітлення об'єкту залежить якість отриманого зображення і відповідно точність визначення геометричних параметрів об'єкту. Тому виникло питання експериментально дослідити та провести аналіз матриці телевізійної вимірювальної системи.

Проведено дослідження освітленості при діафрагмуванні оптичного потоку та було визначено найкращу ділянку для розташування досліджуваного об'єкту та також, визначено розміри тестових об'єктів на прикладі штрихових мір за розробленою методикою.

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Стартап як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (із появою Інтернету як інструменту комунікацій та збуту стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, перетинати кордони між ринками різних країн), і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна маса інноваційних ідей зростає [29].

5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Ідеєю для стартап-проекту є описаний в магістерській дисертації Інформаційно-вимірювальна система лінійних розмірів на приладах із зарядовим зв'язком. Актуальність полягає в тому, що ІВС є надзвичайно перспективним засобом дослідження у реальному часі процесів пошкодження та руйнування оптичних деталей під час випробувань на міцність від різного роду фізичних впливів. При цьому параметрами контролю можуть бути геометричні розміри та переміщення локальних областей деталей, які мають малі (субміліметрові та мікронні) розміри. Існують наукові роботи де описано результати дослідження оптичних об'єктів, однак про застосування ІВС для контролю та вимірювання геометричних розмірів раніше не застосовувались та не описувались.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
ІВС виявлення геометричних розмірів оптичних деталей	Виявлення дефектів мікрометричних розмірів	Стабільна робота, досить швидке виявлення дефектів, обробка результатів займає мало часу.
	Зменшення кількості	Пристрій є досить

	дефектів в подальшому виробництві	малогабаритним, а тому легко може пересуватися безпосередньо на місце експлуатації та в місцях виробництва оптичних деталей
--	-----------------------------------	---

Серед конкурентів для даної ІВС, в Україні існує лише один схожий стенд але в ньому використовується камера з іншою матрицею (CCD): в НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Розробка «КПІ ім Ігоря Сікорського»			
1.	Портативність	+	+		+	
2.	Низька вартість	+	-			+
3.	Якість	+	-			+
4.	Простота в роботі	+	+		+	

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу буде проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 5.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/добробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/ п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	IBC на базі камери з матрицею CMOS	До мікроскопу кріпиться камера на базі матриці CMOS яка з'єднана з комплексом захвату та обробки зображення	Наявні	Доступні
2	IBC на базі камери з матрицею CCD	До мікроскопу кріпиться камера на базі матриці CCD яка з'єднана з комплексом захвату та обробки зображення	Наявні	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: IBC на базі камери з матрицею CMOS, так як вона є найбільш якісною і дешевою та не поступається своїми характеристиками іншим.				

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок щодо можливості технологічної реалізації проекту IBC на Галогенній лампі, а також технологічний шлях, яким це доцільно зробити.

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміку розвитку ринку (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	5000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Забезпечення калібрування камери завдяки еталонним комплектом штрихових мір ГОСТ 11415-78
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20

Рентабельність — поняття, що характеризує економічну ефективність виробництва, за якої за рахунок грошової виручки від реалізації продукції (робіт, послуг) повністю відшкодовує витрати на її виробництво й одержується прибуток як головне джерело розширеного відтворення.

Суть одного із найважливіших методів оцінки економічної ефективності інвестицій полягає у розрахунку їх середньої рентабельності за формулою :

$$R = \frac{P}{l + n} \cdot 100\%,$$

де Р – прибуток за час експлуатації проекту; l – повна сума інвестиційних витрат; n – час експлуатації проекту.

Інвестувати грошові засоби доцільно тоді, коли від цього можна отримати більший прибуток, ніж від їх зберігання у банку. Порівнюючи

середньорічну рентабельність інвестицій зі ставкою банківського відсотка, можна дійти висновку, що вигідніше.

З даної таблиці можна зробити висновок, що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Далі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5).

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Визначення геометричних розмірів об'єктів мікрометричного діапазону	Виробництво та фірми які випускають та обслуговують оптичні прилади Безпосередні користувачі оптичних приладів.	Виробникам необхідний прилад для виявлення безпосередньо під час виробництва, а споживачам уже безпосередньо в процесі експлуатації.	Низька ціна та портативність приладу для дослідження. А також швидкість вимірювання.

Після визначення потенційних груп клієнтів проведемо аналіз ринкового середовища: складемо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 5.6-5.7).

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Очікується вихід на ринок в ареал конкурента	Підвищилися бар'єри входу на ринок: необхідно одержувати ліцензію на виготовлення ІВС.
2	Збут	З цього року наш найбільший оптовий покупець визначає постачальників за результатами тендеру	На ринку з'явилася нова роздрібна сітка, яка в даний момент вибирає постачальників

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Ексклюзив	Виведення на ринок нового виду ІВС	Підвищення потужності виробництва та впровадження в комплекси для виявлення геометричних розмірів мікронного діапазону
2	Збут	Нарощення потужностей виробництва оптичних деталей в Україні, що супроводжується необхідністю в засобах виявлення та контролю	Поява великої кількості потенційних покупців

Далі проведемо аналіз пропозиції: визначимо загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції - монополія	1) різноманітність товарів та послуг; 2) важливе значення має не тільки ціна, а й нецінові чинники (умови продажу, можливість товари в кредит, гарантія, реклама і т. д.); 3) легкий	Мати деяке різноманіття товарів (ІВС виявлення дефектів клейових з'єднань оптичних деталей), проводити рекламні кампанії

	вхід та вихід фірми з галузі	
2. За рівнем конкурентної боротьби - світовий	Виробництво оптичних деталей є розповсюдженим у світі явищем, тому оптико-електронна системи для виявлення дефектів при з'єднанні оптичних деталей необхідна у світовому масштабі	Розробка якісного і досить дешевого продукту та міжнародна реклама
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Використання ІВС можливе не тільки в виробництві оптичних деталей ай для фірм які обслуговують та розповсюджують оптичні вироби на ринку. Також можливе виявлення дефектів в металургії.	Розробка стендів для виявлення дефектів з'єднань
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Існують різні прилади зарубіжних розробок для виявлення дефектів та контролю, але коштують вони за 10000\$ і більше.	Підвищення якості та зменшення ціни ІВС
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Головним фактором є якість виявлення дефектів, а не його ціна	Підвищення якості
6. За інтенсивністю - не марочна	Роль торгової марки незначна, хоча самі марки можуть бути присутніми на ринку	Реклама продукції

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера) (табл. 5.9).

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Оптико-електронна система на основі CCD-матриці	NOVUS	Китайські заводи по виготовленню ламп	Розробник оптичних деталей та їх споживачі	Використання замість оптико-електронних систем
Висновки:	Немає високої конкуренції, адже це державні установи, які не ведуть агресивної конкуренції	- є можливості входу в ринок - є потенційні зарубіжні конкуренти	Ні, постачальники лише впливають на ціну продукту	Так, клієнтам необхідний якісний та швидкий продукт	Немає, так як оптичні елементи не мають сталих характеристик, що призводить до помилок при вимірюванні

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок щодо принципової можливості роботи на ринку з огляду на конкурентну ситуацію.

Також висновок щодо характеристик (сильних сторін), які повинен мати проект, щоб бути конкурентоспроможним на ринку.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в (табл. 5.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 5.2), вимог споживачів до товару (табл. 5.5) та факторів маркетингового середовища (табл. 5.6-5.7) визначено та обгрунтовано перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлено за табл. 5.10

Таблиця 5.10 – Обгрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обгрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Швидкодія IBC	Можливість виявлення дефектів в оптичних деталей за короткий проміжок часу, що є актуальним для виробництва оптичних деталей на конвеєрі.
2	Низька ціна	Через використання не дорогих складових IBC вартість такого стенду є незначною порівняно з професійними виробниками контролю клейових з'єднань

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10) проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.11).

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 5.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками

(прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Інформаційно-вимірювальна система лінійних розмірів на приладах із зарядовим зв'язком

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ОЕС						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Швидкодія ОЕС	15					+		
2	Низька ціна	18			+				

Таблиця 5.12 – SWOT – аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: якість і низька вартість	Слабкі сторони: портативність і дешеві складові ІВС
Можливості: швидкий вихід на ринок дешевого і якісного стенду ІВС	Загрози: особливості роботи з світлодіодними кільцями

На основі SWOT-аналізу можна визначити альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл. 4.9, аналіз потенційних конкурентів).

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.13).

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Підвищення портативності ІВС	Необхідна розробка легкої і переносної споруди. Так можна	3 тижня

		зробити	
2	Підвищення якості освітлення	Використання ламп Галогенних з різними характеристиками. Так, необхідно закупити та протестувати такі лампи	1 тиждні

Обрано другу альтернативу – підвищення якості освітлення, адже доробка приладу буде тривати лише 1 неділю, що прискорить вихід стенду ОЕС на ринок.

5.4. Розробка ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.14).

Таблиця 5.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Фірми які займаються виробництвом оптичних деталей	Так, якщо це буде досить швидкий та якісний стенд	Високий	Середня	Середня
2	Люди, які безпосередньо використовують оптичні прилади у власних	Так, якщо це буде досить дешевий стенд	Середній	Середня	Середня

	потребах				
Які цільові групи обрано: обрано дві цільові групи, адже даний стенд ОЕС буде доступний і досить якісний.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) обираємо цільові групи, де пропонується наш товар, та визначаємо стратегію охоплення ринку:

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 5.15).

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспр оможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Підвищення якості освітлення та обробки зображення ІВС	Весь ринок за рахунок низької вартості та якості ІВС	Якість та ціна	Стратегія лідерства

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	Ні	Буде шукати	Ні, адже в нас є	За рахунок

		нових та можливо забирати у конкурентів	свій дизайн продукту	великих можливостей по об'ємах збуту товарів і продуктивності підприємство зможе добитися менших витрат
--	--	--	-------------------------	--

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. табл. 5.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 5.14) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16) розробляється стратегія позиціонування (табл. 5.17), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту
1	Якість та низька ціна	Стратегія лідерства	Якість та ціна

Результатом виконання підрозділу є узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначає напрями роботи стартап-компанії на ринку.

5.5. Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 5.18 підсумуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Якість	Чітке виявлення дефекту, якісне освітлення дефекту клейового з'єднання	Використання нової схеми з Галогенними лампами та застосування камери на базі матриці КМОП (CMOS)
2	Низька ціна	Дешева ІВС	Використання звичайних Галогенних ламп, які є досить дешевими

Далі розробимо трирівневу маркетингову модель товару: уточняється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 5.19).

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Компактний стенд ОЕС з застосуванням камери на базі матриці CMOS		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1.Швидкість роботи	11 мс	
	2.Вага	2 кг	
	Якість: стандарт АМ1,5		
	Пакування : коробка		
	Марка: НАЕПС + ПСВ		
III. Товар із підкріпленням	До продажу		
	Після продажу		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання:			
Патентування товару			

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 5.20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари- замінники	Рівень цін на товари- аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	2 000 грн	10 000 грн	7000 грн	2000 грн – 10 000 грн

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.21):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Якість роботи БІВС	Доставка	Україна та сусідні країни	Реклама в інтернеті

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл.5.22).

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Необхідний якісний та дешевий продукт	Інтернет, телебачення	Якість та ціна	Наголосити на низькій вартості та високій якості виявлення дефектів	Ми пропонуємо якість за низькою ціною

Результатом є ринкова (маркетингова) програма, що включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, конкурентні переваги ідеї, стан та динаміку ринкового середовища, в межах якого буде впроваджено проект, та відповідну обрану альтернативу ринкової поведінки.

Висновки до розділу 5

На ринку України немає прямих комерційних конкурентів, лише державні установи для виявлення геометричних розмірів дефектів

мікронного діапазону для оптичних деталей. А попит в таких системах зростає через популярність ІВС. Тому розробка стенду ІВС є перспективною та рентабельною справою, адже собівартість продукції є досить низькою через використання дешевих складових.

Серед потенційних клієнтів є як фірми виробники оптичних деталей так і безпосередні користувачі, тому попит на використання систем для виявлення геометричних розмірів дефектів клейових з'єднань буде зростати.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано вибір характеристик, які підлягають дослідженню.
2. Розроблено методики експерименту.
3. Створено лабораторний стенд інформаційно-вимірювальної системи лінійних розмірів на приладах із зарядовим зв'язком для визначення лінійних розмірів мікрооб'єктів та методики для експериментальних досліджень його характеристик.
4. Обґрунтовано вибір тестових об'єктів, реалізовано режим переміщення, досліджено інтервал переміщення об'єкту.
5. Розроблено методику для проведення аналізу освітленості матриці телевізійної вимірювальної системи та визначено діапазон сигналу за яким рекомендовано проводити дослідження.
6. Проведено дослідження освітленості при діафрагмуванні оптичного потоку та було визначено найкращу ділянку для розташування досліджуваного об'єкту.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ:

1. Й.Й. Білінський, І.В. Микула, Б.П. Книш. Класифікація методів вимірювань розмірів мікроскопічних об'єктів // В: Вісник Хмельницького національного університету.
2. Кузин А.Ю. Методы и средства измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне/ Кузин А.Ю., Марютин В.Н., Календин В.В.
3. Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков Н.И., Федин Л.А. Микроскопы, 1969.
4. Измерение малых длин на основе РЭМ / [О.В. Богданкевич, Ж. Желкобаев, В.В. Календин та ін.] // Измерительная техника. – 1985. – № 11. – С. 31–33.
5. Методы обработки и формирования растровых изображений / Авт. сост. О.И. Семенов и др.. Минск: ИТК, 1986. - 96 с.
6. Маслова Н.С. Сканирующая туннельная микроскопия атомной структуры, электронных свойств и поверхностных химических реакций / Н.С. Маслова, В.И. Панов // УФН. – 1988. – Т. 157. –№1. –С. 185–195.
7. Эдельман В.С. Развитие сканирующей туннельной и силовой микроскопии / Эдельман В.С. –ПТЭ. – 1991. – №1. – С. 24–42.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. — 856 с.
9. Аникин А.В., Иерусалимов И.П., Суковатин И.В. Система контроля перемещения слитка. // Современные технологии автоматизации, 2004. — № 1. с. 18-22.
10. Пронин С.П. Измерение размера малого объекта по методу теневой проекции // Измерения, контроль и автоматизация производственных процессов: Доклады 4 Международ.конф. / Под ред. П.И.Госькова. Барнаул: АлтГТУ, 1997. -Т.1., с. 47-57.
11. В.Алехин, И.Мирошниченко, А.Серкин. Лазерный интерферометр для измерения перемещений: журнал Наноіндустрія, випуск 1.

12. <http://ricinstryment.ru/instrumentalnyy-mikroskop-dip-6-u>
13. <http://www.microtechua.com/index.php?lang=ua&module=catalog&category=592>
14. http://asma-pribor.com.ua/catalog/optimeters/optimetr_ikg.html
15. <http://www.atlasmetr.com/index.pl?act=PRODUCT&id=293>
16. А.Ю. Кузин, Д.А. Карабанов. Исследование отклика (механических перемещений) пьезокерамических объектов на воздействие гармонического и импульсного напряжения // Материалы Международной научно-технической конференции 2012г, с. 58.
17. Описание типа средств измерений для государственного реестра. Система лазерная измерительная ЛИС-01М 2009 г, с. 2.
18. Презентация: В.В. Баранов. Оптикоэлектронный измеритель микроперемещений.
19. Техническая документация. Малогабаритный датчик наноперемещения серии IDS-4.
20. <http://www.rusnanonet.ru/nns/31089/equip/?page=17507>
21. Презентация: В.В. Баранов. Оптикоэлектронный измеритель микроперемещений.
22. В.В. Коротаев, А.В. Краснящих «телевизионные измерительные системы» – Санкт-Петербург: 2008 г, «Учебное пособие» - с.6.
23. Н.И. Мищенко «Возможные пути улучшения технических характеристик телевизионных измерительных систем» - 2008 г, «Доклад ТУСУРа, № 2»
24. Маркін М.О. «Оцінка похибки ТВС при визначення геометричних параметрів» - Вісник НТУУ “КПІ”. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2009. – Вип. 38
25. Телевізійні наукові та технологічні прилади та системи: метод. вказівки до викон. лаборатор. робіт для студ. спец. 7.090902 "Наукові, аналітичні та екологічні прилади і системи" / Уклад.: В. А. Порев, С. Х.

Кушнір, М.О. Маркін. – Вид. 2-ге, випр. та допов. – К. : НТУУ "КПІ", 2008. – 44 с.

26. <http://www.laboratorium.dp.ua/item/20>

27. С.Ф. Петренко «Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении» - Киев: «Корнійчук», 2002 р. – 38 с.

28. Руководство по эксплуатации камер NVC-105B / NVC-130BH / NVC-155B / NVC-180BH.

29. <http://5fan.ru/wievjob.php?id=1714>

30. Войтко С.В., Корогодова О.О., Левицька Т.В., Любимова К.О. «Методичні вказівки до виконання організаційно-економічного розділу дипломних проектів для студентів приладобудівного факультету» – Факультет менеджменту та маркетингу. Електронне видання, 2006 р – 20 с.

Додатки

Додаток А. Публікації автора дисертації

1. Дубова М.В. Вплив швидкості переміщення зони плавки на висоту рідкої фази / В. А. Порєв, М. В. Дубова // Перший незалежний науковий вісник. – 2016, №9-10, с.111-114.
2. Дубова М. В. Вимірювання лінійних розмірів за допомогою інформаційно-вимірювальних систем на приладах із зарядовим зв'язком / Дубова М. В., Порєв В. А. // Вісник НТУУ «КП». Приладобудування : збірник наукових праць. – 2017. – Вип. 53(1). – С. 39-43. – Бібліогр.: 8 назв.